annales agronomiques

Bimestriel

1976

Vol. 27 . N° 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1976, **27** (1), 1-16.

LES PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION DES RAYONNEMENTS X ET ÉLECTRONIQUES PAR LES RÉSEAUX ATOMIQUES ; APPLICATION A L'ÉTUDE DE L'ORDRE CRISTALLIN DANS LES MINÉRAUX ARGILEUX

II. — ÉVOLUTION STRUCTURALE DE LA MONTMORILLONITE ASSOCIÉE AU PHÉNOMÈNE DE FIXATION IRRÉVERSIBLE DU POTASSIUM

J. MAMY et J.-P. GAULTIER

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

La montmorillonite est susceptible de fixer le potassium de manière irréversible lorsqu'on la soumet à une série d'alternances d'humectations et de dessiccations. L'évolution des échantillons au cours du phénomène est observée par diffraction des rayons X et microdiffraction électronique. L'analyse des diagrammes permet de montrer que la fixation du potassium est accompagnée d'une réorganisation structurale de la montmorillonite qui affecte le type de superposition des feuillets élémentaires.

INTRODUCTION

On a observé depuis longtemps qu'une fraction des quantités de potassium apportées à un sol peut passer progressivement à l'état non échangeable. Ce phénomène est particulièrement net dans les sols riches en minéraux argileux et en micas. Cette « rétrogradation » du potassium a fait l'objet de nombreux travaux et de nombreuses hypothèses (MORTLAND and GIESEKING, 1951 ; ARIFIN *et al.*, 1973). Il paraît bien établi que les minéraux du type vermiculite, de charge relativement élevée, peuvent fixer le potassium à l'état non échangeable en recréant une structure cris-

talline ordonnée du type mica (BARSHAD, 1950 ; SAWHNEY, 1969). Dans ces minéraux, les cavités ditrigonales des feuillets se font face. Le potassium peut être piégé dans l'espace délimité par les 12 atomes d'oxygène appartenant à deux cavités adjacentes ; il est alors situé à égale distance des charges négatives des deux feuillets et occupe de ce fait une position d'équilibre très stable. Le mécanisme qui intervient dans les minéraux argileux, dont la charge est sensiblement plus faible et qui présentent des désordres importants de superposition des feuillets, n'a pas encore été clairement élucidé.

La fixation irréversible du potassium par la montmorillonite soumise à des dessiccations répétées est un fait d'expérience et il a été montré que la quantité de potassium retenue est proportionnelle à la charge mais n'est pas liée à sa localisation (WEIR, 1965). Quelques autres cations tels que le lithium, l'ammonium, et partiellement le rubidium, peuvent passer à l'état non échangeable, mais les conditions de rétention et vraisemblablement les mécanismes mis en jeu sont différents. La spécificité de ces derniers doit faire intervenir la taille du cation, son affinité pour l'eau et sa localisation au niveau interfeuillet.

Les études portant sur la fixation du potassium par les silicates phylliteux reposent pratiquement toutes sur l'observation et l'interprétation de la variation de la distance interfeuillet et parfois de la forme et de l'intensité du pic correspondant à la première réflexion basale (VAN OLPHEN, 1966). Ces seules données ne suffisent pas à déterminer la nature du phénomène qui provoque le blocage du potassium. On peut cependant faire les hypothèses suivantes :

1. Le potassium pourrait pénétrer de plus en plus profondément dans les cavités ditrigonales de la surface, et ne serait plus libéré au-delà d'un seuil déterminé. Le mécanisme de fixation irréversible du lithium qui perd son échangeabilité en pénétrant dans le réseau doit être évoqué à ce propos (HOFMANN and KLEMEN, 1950 ; MERING et GLAESER, 1967 ; CALVET et PROST, 1970), mais le potassium, en raison de sa taille, ne peut pas être fixé de cette manière.

2. Le potassium pourrait être redistribué au niveau des espaces interfeuillets par suite de la constitution d'une structure cristalline plus stable, du type mica.

Ces deux hypothèses ne s'excluent d'ailleurs pas mutuellement ; MERING et GLAESER (1967) ont en effet montré que le passage du lithium dans la couche octaédrique de la montmorillonite s'accompagne d'une réorganisation structurale partielle des cristallites élémentaires. C'est cependant la seconde hypothèse qui a ouvert la voie la plus fructueuse dans le cas du potassium, et dont nous rendrons compte ici.

I. — PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Le fait de soumettre une montmorillonite potassique à une série d'alternances d'humectations et de dessiccations (HD) provoque la diminution de sa capacité d'échange (TRUOG and JONES RANDALL, 1938). C'est un procédé simple qui simule des conditions d'évolution analogues à celles que l'on peut trouver dans le milieu naturel ; à condition, bien entendu, de ne pas provoquer la dessiccation à une

température trop élevée. Si l'on opère à la température et à l'atmosphère ambiante, on observe effectivement une diminution progressive de la capacité d'échange, mais elle se produit très lentement.

Il existe une température minimum, 70°C environ, à partir de laquelle le phénomène devient beaucoup plus rapide. Ce sont les conditions de déshydratation qui paraissent être le facteur dominant, car des températures plus élevées (160° ou 240°C par exemple) n'augmentent pas la quantité de potassium fixé à nombres d'HD donnés. Les expériences présentées ont été réalisées à la température de 80°C.

Le minéral étudié est une montmorillonite du Wyoming de capacité d'échange égale à 94 méq./100 g. Les échantillons saturés par du potassium sont mis en suspension dans l'eau par agitation [1], puis placés à l'étuve à 80°C pendant 12 heures environ, ce qui constitue une alternance d'humectation et de dessiccation (HD). A des nombres déterminés d'HD on effectue des prélèvements sur lesquels on dose la quantité de potassium échangeable contre un autre cation, et procède à différentes observations (diffraction X, microdiffraction électronique par exemple).

La figure 1 représente la variation de la quantité de potassium restant échangeable en fonction du nombre d'HD. Cette variation est rapide au début de l'expérience puis la quantité échangeable paraît tendre vers une valeur limite de l'ordre de 35 méq./100 g, mais nous n'avons pas dépassé 150 HD.

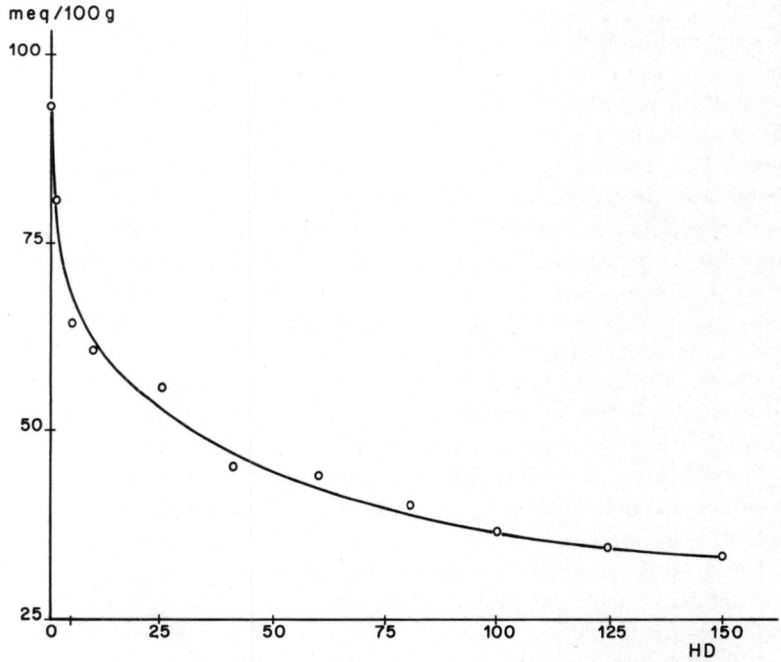


FIG. 1. — *Variation de la quantité de K échangeable de la montmorillonite en fonction du nombre d'HD*

[1] On travaille initialement avec des quantités de l'ordre du gramme auxquelles on ajoute environ 50 ml d'eau.

2. — TECHNIQUES D'ÉTUDE ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

L'évolution de la montmorillonite vers un état de plus grande stabilité pouvant trouver son origine dans un accroissement de l'ordre cristallin, c'est à l'étude de celui-ci que le présent travail a été consacré.

La diffraction X et la microdiffraction électronique sont les techniques les mieux adaptées à l'observation de l'évolution structurale des silicates phylliteux, moyennant différentes précautions d'ordre expérimental dont nous avons fait état dans la première partie de cet article.

A. — *Évolution des espacements interfeuillets de la montmorillonite au cours du processus de fixation irréversible du potassium*

La donnée la plus aisément accessible à l'expérience est la variation de la distance basale de l'argile au cours de la rétrogradation du K.

Nous avons étudié cette variation d'une part pour le minéral séché sous vide après séjour à l'étuve à 80°C, et d'autre part pour le minéral soumis à une humidité relative de 100 p. 100 à la température ambiante, ce qui provoque l'ouverture de la montmorillonite K à plus d'une couche d'eau, avant le traitement par dessiccation.

Dans les conditions de séchage choisies, l'espacement initial est voisin de 10,30 Å et évolue vers la valeur limite de 9,97Å. Cet espacement initial est vraisemblablement dû à une hydratation résiduelle car il correspond à une interstratification (les ordres successifs de réflexion ne forment pas une série rationnelle).

Lorsque l'on soumet les différents échantillons de montmorillonite K à une humidité relative de 100 p. 100 à la température ambiante, on constate que l'espacement interfeuillet décroît avec le nombre croissant d'HD. A 150 HD, on observe encore une ouverture résiduelle de 10,16 Å (fig. 2). Toutes les valeurs d'espacement observées correspondent à des états interstratifiés dans lesquels le nombre de feuillets fermés croît progressivement. Si le blocage du K n'était assuré que par la fermeture des feuillets, la quantité de K fixé devrait être, pour un nombre donné d'HD, proportionnelle au taux de feuillets à 10 Å. Dans un graphique représentant le pourcentage de K fixé en fonction du pourcentage de feuillets à 10 Å, les points seraient alors situés sur la première bissectrice. Le calcul doit évidemment tenir compte du fait que le K adsorbé au niveau des surfaces externes ne peut pas être piégé et demeure échangeable. La surface totale de l'échantillon de montmorillonite utilisé est de 790 m²/g, sa surface externe de 92 m²/g ; il y a par conséquent 12 méq./100 g de K sur cette surface externe. Dans ces conditions, le pourcentage de K fixé doit être calculé par rapport à un taux de K interfeuillet de 82 méq./100 g. Le pourcentage de feuillets à 10 Å est déterminé sur la base des calculs de HENDRICKS et TELLER (1942) pour un interstratifié 9,97-12,4 Å.

La courbe obtenue (fig. 3) montre qu'au-delà de 25 p. 100 de K fixé, tous les points sont au-dessus de la première bissectrice, ce qui indique un taux de feuillets fermés très supérieur au taux de K fixé. Ce résultat paradoxal est difficilement explicable si l'on ne met pas en cause les éléments du calcul. En revenant

à la courbe de la figure 1, on voit en effet que la valeur de 12 méq./100 g utilisée dans le calcul précédent comme valeur limite de la quantité de K échangeable ne correspond certainement pas à la réalité et que celle-ci est plus vraisemblablement de l'ordre de 30 méq./100 g.

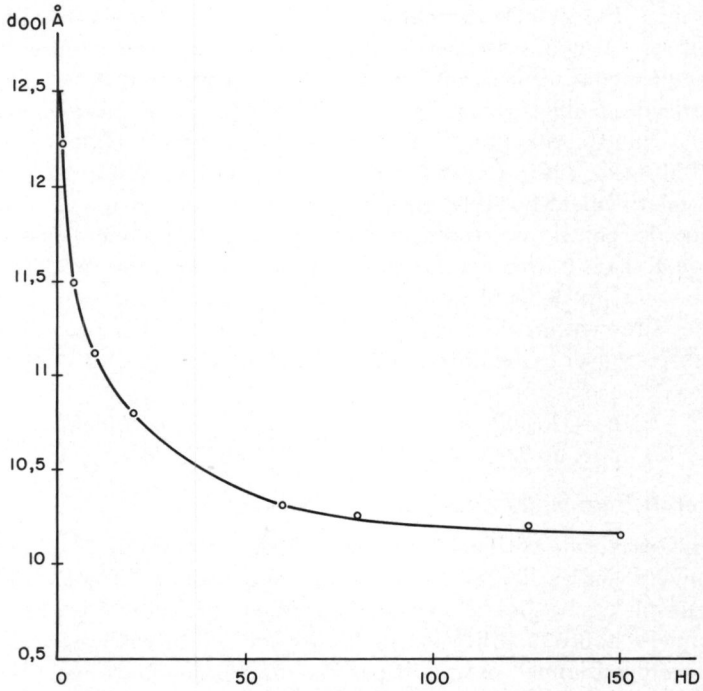


FIG. 2. — *Variation de l'espacement* d_{001} *d'une montmorillonite K soumise à une HR de 100 p. 100, lorsque le nombre d'HD croît*

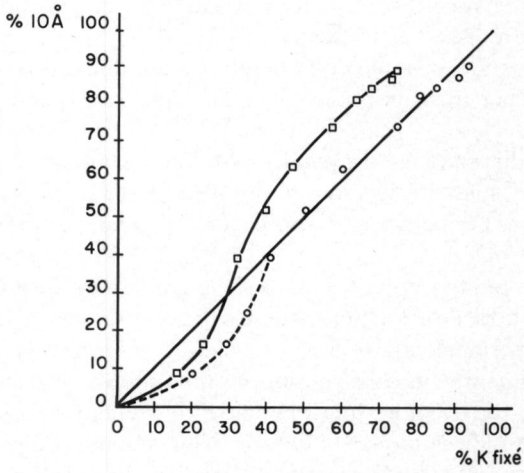


FIG. 3. — *Variation de la proportion de feuillets à 10 Å en fonction du taux de K fixé irréversiblement*

Le calcul du pourcentage de K fixé par rapport à une valeur limite égale à 64 méq./100 g pour le K susceptible d'être bloqué au niveau interfeuillet, paraît vérifier cette hypothèse : tous les points représentatifs à partir de 40 p. 100 de K fixé (petits cercles sur la fig. 3) sont situés sur la première bissectrice.

Ce résultat signifie que, quel que soit le nombre d'HD subi par la montmorillonite K, 30 méq./100 g de K demeureront échangeables. Ces 30 méq. comprennent évidemment les 12 méq. attribués à la surface externe de la montmorillonite. Les 18 méq. complémentaires peuvent correspondre pour une part à des charges de rupture des bords des feuillets (ces charges ont été effectivement mises en évidence dans le cas de la montmorillonite Li par différents auteurs : GREEN-KELLY, 1955 ; GLAESER et MERING, 1967 ; CALVET et PROST, 1971) et pour une autre part à des sites de fixation relativement instables en raison d'excès ou de défauts de charges locaux. Enfin l'écart des points représentatifs par rapport à la première bissectrice avant 40 p. 100 de K fixé, et qui signifie qu'il y a dans ce domaine proportionnellement plus de K bloqué que de feuillets fermés, peut être attribué à la saturation prioritaire par le K des sites voisins de 2 charges et dont la proportion peut atteindre effectivement 40 p. 100 des sites interfeuillets (MERING et GLAESER, 1967).

B. — *Évolution de la structure de la montmorillonite au cours du processus de fixation irréversible du potassium*

1. *Étude par diffraction des rayons X.*

On peut essayer de vérifier l'hypothèse d'une évolution de l'organisation structurale du minéral sur les diagrammes de poudre obtenus par diffractométrie, en déterminant les profils des bandes *hk*. Ces bandes sont en effet caractéristiques des réseaux bidimensionnels ; toute modification de l'ordre cristallin dans le sens de la création d'un ordre tridimensionnel, se traduit par une modulation de ces profils en raison de l'individualisation des réflexions *hkl*. C'est ce qui a été observé par MERING et GLAESER (1967) dans le cas de la montmorillonite Li chauffée à 250°C. Le même phénomène peut être mis en évidence avec la montmorillonite K soumise à un nombre croissant d'HD : les bandes *hk*, et surtout la bande 13, 20 présentent une modulation de plus en plus marquée.

La figure 4 donne l'exemple de la bande 13, 20 ; lorsque le nombre d'HD croît, on voit se développer un maximum secondaire qui correspond à l'apparition de la raie 201.

L'étude des diagrammes de poudre obtenus en diffractométrie, en raison de la faible part de l'espace réciproque observable et de la désorientation statistique des cristallites, ne permet pas d'approcher de manière précise et détaillée la structure des lignes *hk*.

La technique photographique, associée au montage de l'échantillon présenté dans la première partie de cet article pour des dépôts orientés (rotation de la plaquette autour d'un axe perpendiculaire à c^*), donne une information beaucoup plus riche.

On laisse sédimenter une suspension de montmorillonite sur une surface plane et, après séchage, on découpe une plaquette de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur et de 1 ou 2 mm de côté dans le dépôt obtenu. La plaquette est disposée au centre d'une chambre cylindrique et irradiée de manière que le faisceau de rayons X soit contenu dans son plan (fig. 5). Cette disposition donne le minimum

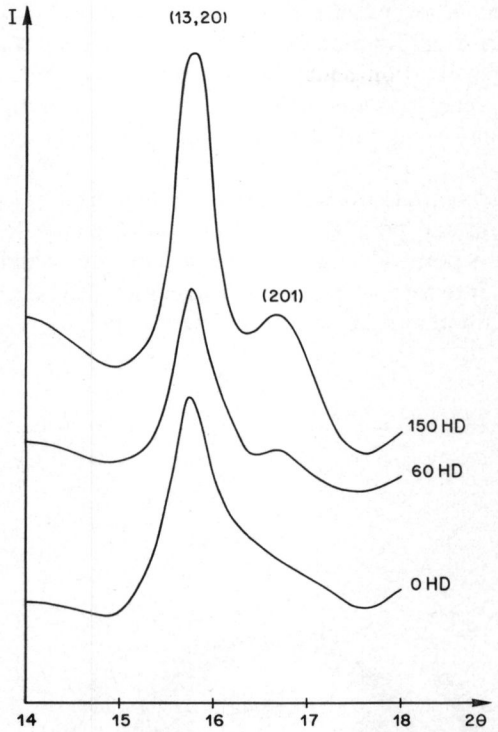


FIG. 4. — *Évolution de la bande 13,20 de la montmorillonite K avec le nombre d'HD*

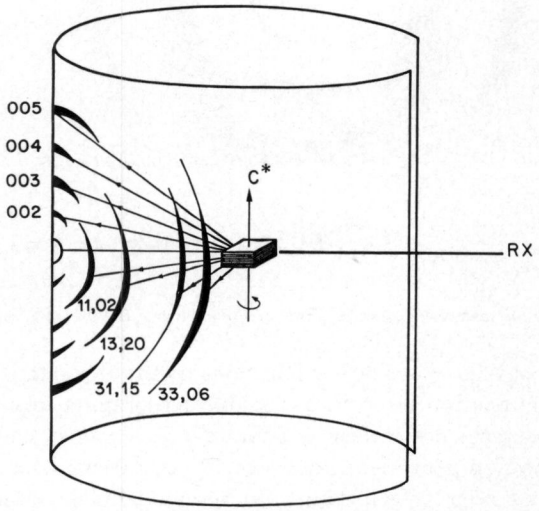


FIG. 5. — *Montage utilisé pour l'obtention des diagrammes de diffraction X à partir d'échantillons de montmorillonite formés de cristallites orientés*

de déformation aux lignes *hk* qui n'apparaissent cependant pas sous forme de droites mais de courbes dont la forme est donnée par les abaques de BERNAL (1926).

Les diagrammes de diffraction X obtenus avec la montmorillonite K n'ayant subi qu'une seule dessiccation sont conformes au caractère bidimensionnel, donc turbostratique, du réseau dont les cristallites sont formés par un ensemble de feuillets élémentaires superposés avec des rotations et des translations aléatoires de leurs axes respectifs.

Comme on le voit sur la figure 6, un diagramme est formé par la série des raies 00l localisées le long d'un axe parallèle à la direction c^* et par la série des bandes *hk* localisées sur un axe perpendiculaire au précédent. Les bandes *hk* présentent un unique maximum d'intensité centré sur cet axe. Le cliché est donc bien en accord avec la figure de diffraction d'un réseau bidimensionnel.

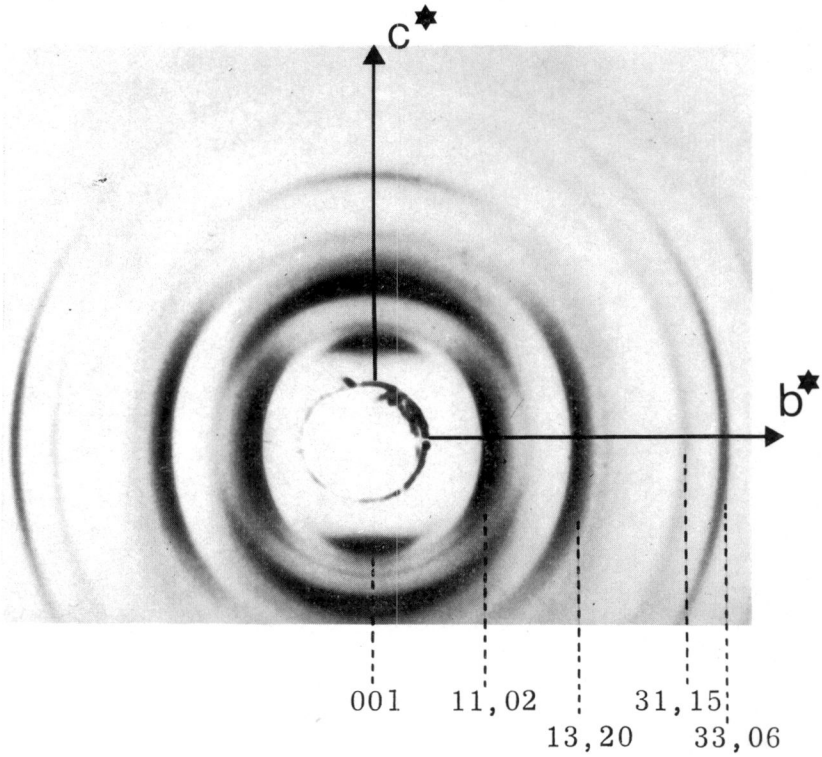
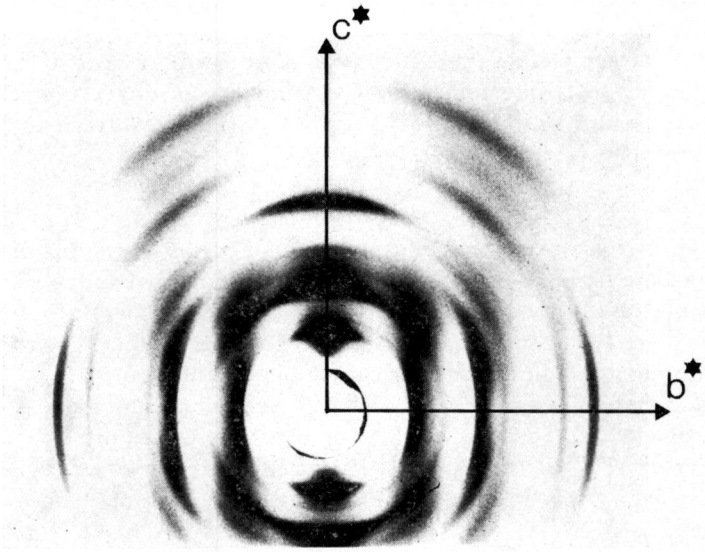


FIG. 6. — *Diagramme de diffraction X d'une montmorillonite K après une seule dessiccation*

Sur les clichés obtenus avec des échantillons ayant été soumis à 80 HD ou plus, on observe une modification importante du diffractogramme résultant de la modulation en taches discrètes des intensités diffractées le long de chaque ligne *hk*. Sur chacune de ces lignes, on peut identifier les taches successives d'une série *hkl*, situées à l'emplacement des nœuds réciproques du réseau tridimensionnel que l'on peut construire à partir des paramètres cristallins de la montmorillonite. Dans la figure 7, le diagramme de diffraction X et le schéma qui l'accompagne donnent les éléments de cette interprétation.



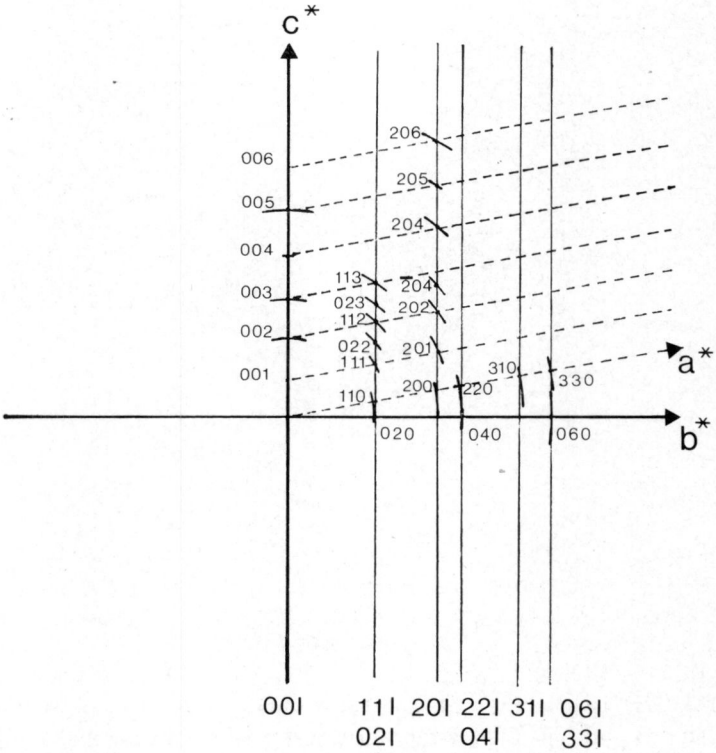


FIG. 7. — *En haut : diagramme de diffraction X d'une montmorillonite K après 150 HD*
En bas : schéma d'interprétation du diagramme

Les diagrammes de diffraction X mettent bien en évidence l'établissement progressif d'une structure de caractère tridimensionnel dans la montmorillonite K, mais ils ne permettent pas de préciser le type d'ordre qui succède à l'empilement turbostratique initial. La microdiffraction électronique qui donne une image de la répartition dans l'espace réciproque des lignes *hk* apporte par contre des informations complémentaires dans ce domaine.

2. *Étude par microdiffraction électronique.*

Les clichés de microdiffraction électronique obtenus avec un cristallite d'argile dont le plan de base est placé perpendiculairement à la direction du faisceau incident, matérialisent l'intersection des lignes réciproques *hk* avec le plan du film photographique. Comme ces lignes sont perpendiculaires au plan du film, l'image donne la distribution des lignes *hk* des feuillets successifs du cristallite.

La figure 8 a été obtenue avec un échantillon de montmorillonite K après une seule dessiccation à 80°C. Tous les cristallites observés donnent le même type d'image. On voit que les lignes *hk* se distribuent au hasard le long d'une série de cylindres dont chacun correspond à un couple de valeurs *hk*. C'est la définition même d'un cristal turbostratique.

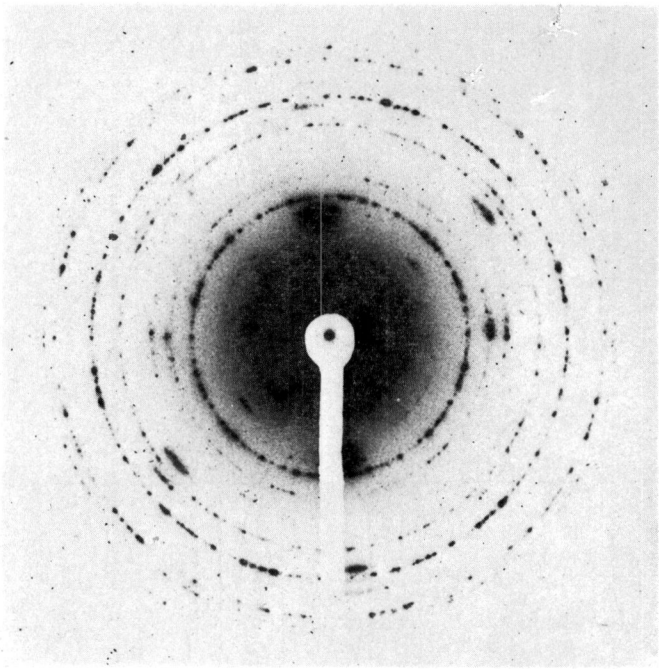


FIG. 8. — *Diagramme de microdiffraction électronique d'une montmorillonite K après une seule dessiccation*

Pour 40 HD, les clichés ont l'aspect de celui de la figure 9. Le regroupement des lignes *hk* en des positions bien déterminées à répartition hexagonale, apparaît nettement, mais quelques feuillets sont encore disposés au hasard. A partir de 80 HD, tous les cristallites produisent des diagrammes identiques à celui de la figure 10 :

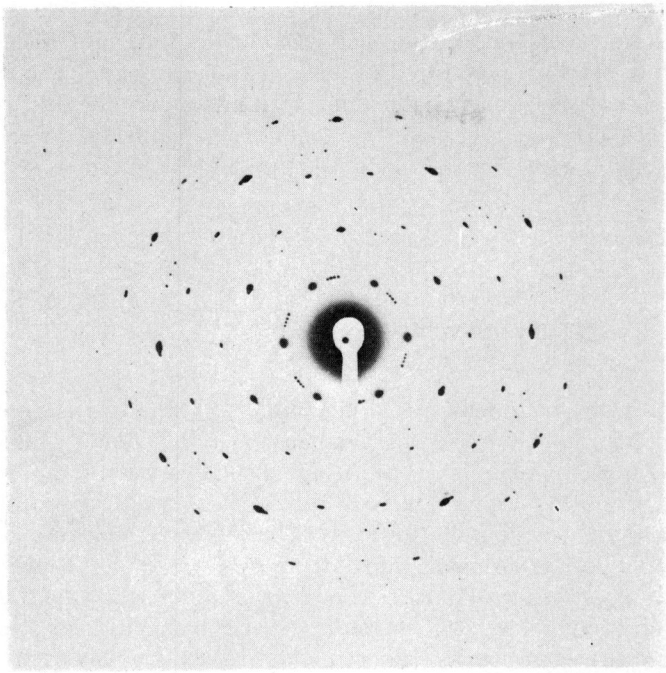


FIG. 9. — *Diagramme de microdiffraction électronique d'une montmorillonite K après 40 HD*

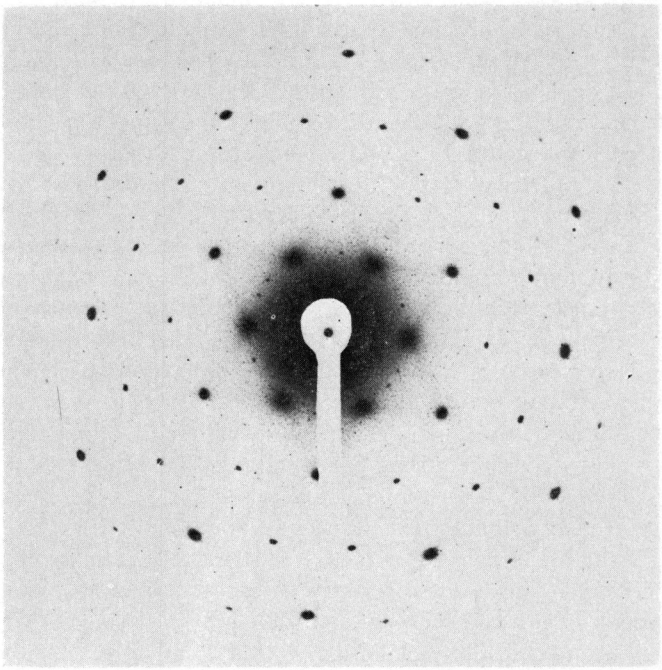


FIG. 10. — *Diagramme de microdiffraction électronique d'une montmorillonite K après 80 HD*

toutes les lignes *hk* sont regroupées aux nœuds d'un réseau plan hexagonal et toutes les taches correspondant à un même couple *hk* ont des intensités égales.

Ce résultat ne peut s'interpréter qu'en considérant que la superposition des feuillets élémentaires n'est plus aléatoire, mais fait intervenir un ordre défini de superposition de telle sorte que les espaces réciproques des feuillets successifs coïncident. Pour des cristallites épais on observe le même type de diagramme, les taches étant reliées entre elles par des traînées diffuses.

3. — DISCUSSION ET ESSAI D'INTERPRÉTATION

L'évolution des diagrammes de diffraction X de la montmorillonite K, initialement caractéristiques d'un réseau bidimensionnel et prenant, à mesure que le nombre d'HD croît, un aspect caractéristique de la formation d'un ordre tridimensionnel, montre qu'il n'y a plus seulement régularité de disposition des plans suivant la seule direction c^*, mais qu'un ordre régulier de correspondance du réseau des feuillets s'établit progressivement dans les directions *a* et *b*. Ce fait est confirmé par les diagrammes de microdiffraction électronique qui établissent la coïncidence des espaces réciproques des feuillets successifs. En partant d'une structure turbostratique, une telle évolution ne peut être obtenue que par des rotations (pouvant être associées à des glissements) des feuillets les uns par rapport aux autres. C'est donc une modification importante de la structure des cristallites qui intervient et qui correspond à un état de stabilité accrue de l'édifice minéral.

Nous avons vu que l'intensité était uniforme pour chaque série de taches de microdiffraction électronique correspondant à un même angle de Bragg (exemple : 11 et 02 pour la première série en partant du centre). Or la symétrie cristalline du feuillet élémentaire (C 2) est telle que le feuillet isolé ne peut pas donner les mêmes intensités à toutes les taches d'une série (OBERLIN et MERING, 1962). Si l'ordre de superposition des feuillets était rigoureux, le diagramme obtenu avec un cristallite devrait être identique à celui du feuillet élémentaire ; ce n'est pas le cas ; il faut donc admettre que les axes cristallographiques des feuillets successifs présentent entre eux des décalages angulaires. Mais ces derniers ne sont pas quelconques puisqu'il faut respecter la symétrie hexagonale des diagrammes de diffraction électronique. L'examen de l'espace réciproque des feuillets élémentaires montre qu'il suffit de respecter des angles de rotation des axes égaux à des multiples de 60° pour être en accord avec cette condition.

Deux possibilités théoriques de superposition régulière des feuillets peuvent être retenues ; elles sont schématisées par la figure 11 qui représente les vues en plan et en coupe du réseau de deux feuillets superposés.

a) Les cavités ditrigonales des surfaces en contact de deux feuillets successifs se font face (fig. 11 *a*). Dans cette structure, le potassium peut occuper une position identique à celle qui est observée pour les micas. La superposition rigoureuse des cavités ditrigonales peut être conservée par des rotations relatives de 120° des axes cristallographiques des feuillets successifs.

Ce modèle se trouve en contradiction avec un travail de MERING et

GLAESER (1967) qui démontrent, sur la base d'un calcul de répartition des charges des feuillets, qu'un empilement ordonné dans lequel les cavités ditrigonales se font face, ne peut être plus stable que l'empilement turbostratique (sauf si les cations monovalents sont susceptibles de pénétrer dans la couche octaédrique). Cette remarque nous conduit à proposer une deuxième hypothèse.

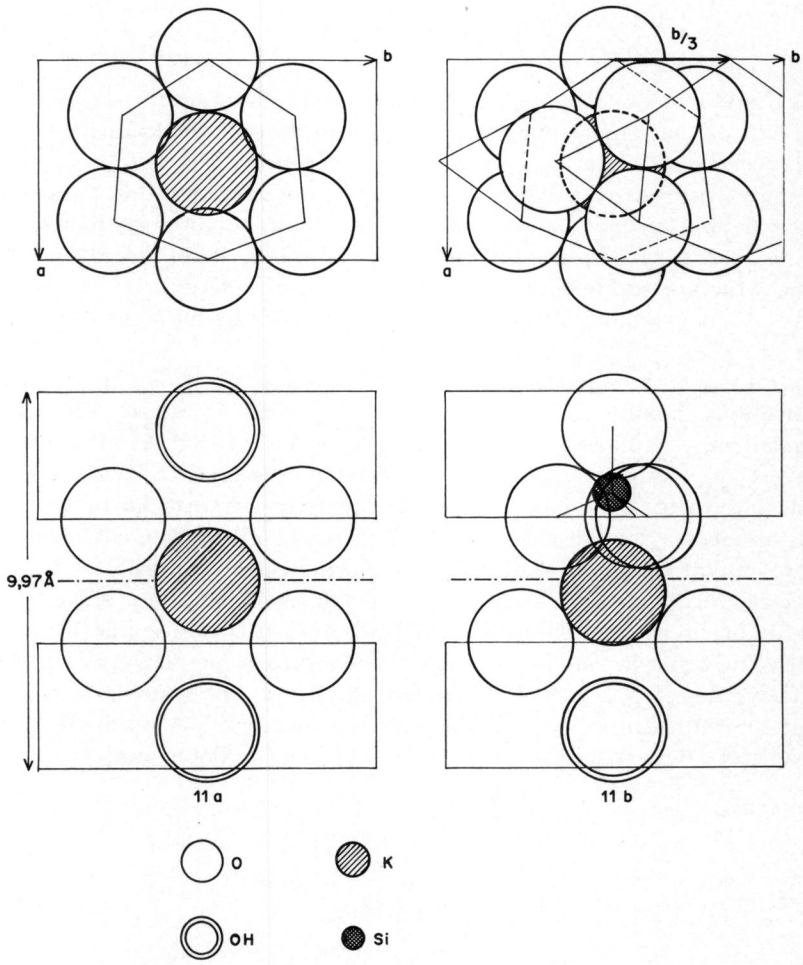


FIG. 11. — *Représentation schématique de la disposition du K dans deux types d'empilement ordonné des feuillets élémentaires*

a) Superposition rigoureuse des cavités ditrigonales
b) Glissement relatif de *b*/3 des cavités ditrigonales

b) Les cavités ditrigonales ne se font pas face, mais présentent des glissements réguliers de $\vec{b}/3$ les unes par rapport aux autres (fig. 11 *b*). Ce type de structure impose au potassium une position légèrement dissymétrique, au niveau interfeuillet, entre les 6 atomes d'oxygène d'une cavité ditrigonale et les 3 atomes d'oxygène de base d'un tétraèdre de l'autre feuillet. Des rotations relatives des axes cristallographiques

des deux feuillets adjacents, d'angles multiples de 60°, sont compatibles avec le maintien de l'ordre d'empilement.

Ces deux modèles sont qualitativement en accord avec les diagrammes de diffraction X et électroniques observés.

CONCLUSION

Ces résultats montrent qu'une argile du type montmorillonite peut évoluer vers un état de plus grande stabilité correspondant à un accroissement d'ordre cristallin dans lequel la rétention du potassium est très importante. Nous pensons que ce mécanisme peut être une des causes de la fixation irréversible du potassium dans les sols. Une des raisons pour lesquelles on ne l'a pas toujours clairement attribué aux minéraux du type montmorillonite pourrait-être que ce minéral, en évoluant vers une structure tridimensionnelle, présente des caractères très proches de ceux des illites. C'est une des questions posées par ces résultats du point de vue pédogénétique.

Le traitement des échantillons par l'éthylène glycol montre qu'une montmorillonite potassique soumise à 80 HD, et qui ne s'hydrate plus, fixe cet éthylène glycol en donnant un espacement interfeuillet de 17,4 Å. A 150 HD, on observe encore une ouverture, mais une fraction de l'échantillon demeure à 10 Å. Il semble donc que si les propriétés de la montmorillonite potassique restent, dans une assez large mesure, différentes de celles des illites, elles peuvent, à la longue, effectivement évoluer vers un état tel que la distinction soit pratiquement impossible.

Il serait nécessaire, pour répondre aux différentes questions soulevées par ce travail, de préciser le mieux possible la distribution et la position des cations interfoliaires et de tester la validité des modèles de structure proposés par l'exploitation quantitative des diagrammes de diffraction X. Enfin, la valeur de la charge et sa localisation (tétraèdrique ou octaédrique) peuvent aussi jouer un rôle important dans l'aptitude des smectites à fixer irréversiblement le potassium.

Reçu pour publication en mars 1976.

SUMMARY

DIFFRACTION OF X-RAYS AND ELECTRONS BY ATOMIC LATTICES; APPLICATION TO THE STUDY OF CRYSTAL ORDER IN CLAY MINERALS. II. — EVOLUTION OF MONTMORILLONITE STRUCTURE ASSOCIATED WITH IRREVERSIBLE POTASSIUM FIXATION

Montmorillonite is liable to fix potassium irreversibly when submitted to a series of alternative wetting and drying. The sample evolution during the fixation is observed through X-ray diffraction and selected area diffraction. The pattern analysis allows to show that potassium fixation is associated with a re-arrangement of montmorillonite structure which concerns the staking type of the elementary layers.

ZUSAMMENFASSUNG

DIFFRAKTION DER ROENTGEN-UND ELEKTRONENSTRAHLEN DURCH DIE ATOMGITTER : ANWENDUNG AUF DIE UNTERSUCHUNG DER KRISTALLREIHENFOLGE IN DEN TONMINERALIEN. ZWEITER TEIL : STRUKTURÄNDERUNG DES MONTMORILLONITS INFOLGE NICHT UMKEHRBARER KALIUMFIXIERUNG

Der Montmorillonit ist zur nicht umkehrbaren Kaliumfixierung fähig, wenn er serienweise Anfeuchten- und Austrocknenabwechslungen unterworfen ist. Die Probeänderung während der Kaliumfixierung wird mit Roentgenstrahlen-diffraktion und Elektronenmikrodiffraktion beobachtet. Die Analyse der Diagramme erlaubt zu beweisen, dass die Kaliumfixierung mit einer Strukturneugestaltung des Montmorillonits verbunden ist, die das Schichtungmuster der elementaren Blättchen betrifft.

РЕЗЮМЕ

Явления диффракции рентгеновского и электронного излучений атомическими сетками : применение при изучении кристаллического порядка в глинистых минералах. — II. Эволюция структуры монтмориллонита, связанная с явлением необратимого закрепления калия.

Ж. МАМИ, Ж. П. ГОЛЬТЬЕ.

Монтмориллонит, подверженный серии поочередных увлажнений и высушиваний, способен необратимо фиксировать калий. Эволюцию образцов в течении этого явления можно наблюдать при помощи диффракции рентгеновских лучей и электронной микродиффракции. Анализ диаграмм показывает, что закрепление калия сопровождается реорганизацией структуры монтмориллонита касающейся типа наслаивания элементарных пластов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARIFIN H. F., TAN K. H., 1973. Potassium fixation and reconstitution of micaceous structures in soils. *Soil Sci.*, **116**, 31-35.

BARSHAD I., 1950. Effect of interlayer cations on the expansion of mica type crystal lattice. *Am. Mineralogist*, **35**, 225-238.

BERNAL J. D., 1926. On the interpretation of X Ray single crystal rotation photographs. *Proc. Roy. Soc. London* A., **113**, 117-160.

CALVET R., PROST R., 1970. Cation migration into empty octahedral sites and surface properties of clays. *Clays clay miner.*, **19**, 175-186.

GLAESER R., MERING J., 1967. Effet du chauffage sur les montmorillonites saturées de cations de petit rayon. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **265**, 833-835.

GREENE-KELLY R., 1955. Dehydration of the montmorillonite minerals. *Mineralog. mag.*, **30**, 604-615.

HENDRICKS S. B., TELLER E., 1942. X ray interference in partially ordered layer lattices. *J. Chem. Phys.*, **10**, 147-167.

HOFMANN V., KLEMEN R., 1950. Verlust der Austaush fähigkeit von Lithiumionen und Bentonit durch Erhitzung. *Z. Anorg. Allgem. Chem.*, **262**, 95-99.

MERING J., GLAESER R., 1967. Réarrangement structural de la montmorillonite Li sous l'effet du chauffage. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **265**, 1153-1156.

MORTLAND M. M., GIESEKING J. E., 1951. Influence of the silicate ion on potassium fixation. *Soil Sci.*, **71**, 381-385.

OBERLIN A., MERING J., 1962. Observations en microscopie et microdiffraction électronique sur la montmorillonite Na. *J. Microscopie*, **1**, 107-120.

SAWHNEY B. L., 1969. Regularity of interstratification as affected by charge density in layer silicates. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **33**, 42-46.

TRUOG E., JONES RANDALL J., 1938. Fate of soluble potash applied to soils. *Ind. eng. Chem.*, **30**, (8), 882-885.

VAN OLPHEN H., 1966. Collapse of potassium montmorillonite clays upon heating. Potassium fixation. *Clays clay miner.*, **14**, 393-405.

WEIR A. H., 1965. Potassium retention in montmorillonites. *Clay miner.*, **6**, 17-22.

Ann. agron., 1976, **27** (1), 17-31.

LES PROPRIÉTÉS D'ÉCHANGEUR CATIONIQUE DE LA TOURBE DE SPHAIGNES : ÉCHANGES BICATIONIQUES ENTRE LE PROTON ET UN CATION MÉTALLIQUE

J. P. ANDRÉ
avec la collaboration technique de Carmelle GIACCO et Lucette PIJAROWSKI

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale, I. N. R. A., 06602 Antibes

---

RÉSUMÉ

On a étudié expérimentalement les échanges bicationiques, sur une tourbe de sphaignes, entre le proton H et un cation monovalent (K ou NH_4), divalent (Ca ou Mg) et trivalent (La). Les paramètres dont dépend la capacité d'échange sont mis en évidence par une représentation graphique et une approche analytique.

INTRODUCTION

Les propriétés d'échangeur d'ions des matières organiques d'origine végétale en voie d'humification, susceptibles d'être utilisées à des fins agronomiques, sont relativement peu étudiées ; les principales recherches concernant la matière organique s'attachent plus à l'étude de la structure des constituants humiques et fulviques qu'on peut en extraire qu'aux propriétés de surface des produits d'origine (VAN DIJK, 1958 ; FLAIG, 1969 ; GILMOUR et COLEMAN, 1971 ; JACQUIN, 1963 ; POSNER, 1964 ; SCHNITZER et SKINNER, 1965 et 1969). Les publications consacrées à la matière organique brute, la tourbe en particulier, sont le plus souvent orientées vers des applications horticoles immédiates (PENNINGSFELD, 1973 ; PUUSTJÄRVI, 1956 et 1971).

Pourtant la tourbe se prête aisément à une étude physicochimique précise, quoique globale : suffisamment stable en suspension aqueuse dans un large domaine de pH, obéissant aux lois générales des échangeurs cationiques faibles, comme nous

pensons pouvoir le montrer dans cette étude, une tourbe de sphaignes pure peut être utilisée comme modèle expérimental et comme référence pour l'appréciation objective de plusieurs propriétés des produits de remplacement.

Reprenant la description d'un modèle d'échangeur développé par ailleurs ainsi que les définitions et les considérations théoriques qui s'y rapportent (ANDRÉ, 1975), nous examinerons ici les échanges bicationiques entre le proton et un cation métallique. L'étude des échanges tricationiques entre le proton et deux cations métalliques et la résolution de problèmes pratiques de prévision d'équilibre appliqués aux substrats de tourbe seront publiées séparément.

Le choix des cations, initialement limité à des éléments d'intérêt agronomique, K, NH_4, Ca, Mg, a été étendu à un cation trivalent, le lanthane La, nous permettant ainsi de mieux faire apparaître l'effet de la valence sur l'échange ionique.

Dans les échanges bicationiques entre le proton et un cation métallique, l'équilibre d'échange :

$$\overline{H} + M \leftrightharpoons \overline{M} + H \qquad (1)$$

est déplacé lorsque les activités (M) et (H) varient dans la phase liquide : la valeur de la CEC, c'est-à-dire la valeur de ($\overline{M}$) pour l'unité de masse de tourbe, dépend donc, pour chaque équilibre, à la fois du pH et de l'activité (M) dans la phase liquide ($\overline{H}$ et $\overline{M}$ désignant les cations absorbés, en équivalents par unité de masse d'échangeur).

Les courbes expérimentales, déterminées par points, représentent donc, pour chaque couple de cations H/M, la variation de la CEC (la CEC est désignée par le symbole $\overline{C}$) en fonction du pH, (M) étant fixée pour chaque courbe à une valeur donnée.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Choix et préparation de la tourbe

Nous avons utilisé une tourbe de sphaignes acide (tourbe blonde) d'origine allemande (Floratorf).

La tourbe est d'abord séchée à l'air et broyée en particules de 0,1 à 0,5 mm environ.

Sous cette forme, elle est mise en suspension dans l'eau (on opère sous vide, pour accélérer l'imbibition). Lorsque les particules sont totalement immergées, la suspension est amenée à pH 1 avec HCl, agitée pendant 4 heures, filtrée sur Büchner et lavée à l'eau de haute résistivité jusqu'à la disparition de Cl^- ; le pH du percolat se stabilise aux environs de 4,5-5,0, selon le débit de percolation. A nouveau séchée à l'air et réhomogénéisée, la tourbe est conservée en flacon fermé. L'humidité à 105° est mesurée sur chaque échantillon ainsi préparé.

Les cations métalliques sont éliminés en majeure partie par cette opération : (tabl. 1) ; la tourbe est dite sous forme $\overline{H}$.

Protocoles expérimentaux des échanges

a) *Phase solide.*

La prise d'essai habituelle $\mathcal{M}$ est de 500 mg de tourbe forme $\overline{H}$ séchée à l'air, d'humidité connue.

b) *Phase liquide.*

Le volume $\mathcal{V}$ de la phase liquide est habituellement de 100 ml.

Les anions accompagnant les cations sont Cl^- et OH^-, seuls ou ensemble. Dans les conditions de pH choisies, il ne se forme pas de complexes entre ces anions et les cations K, NH_4, Ca, Mg, La (BIEDERMANN et CIAVATTA, 1961).

TABLEAU I

Analyse minérale partielle de la tourbe brute et de la tourbe lavée avec HCl N/10

	Tourbe brute	Tourbe « forme H »
– Cendres (p. 100 de la MS)	2,00	1,15
– Insoluble des cendres dans HCl 1 N à chaud (p. 100 MS)	1,0	1,0
– Teneur en cations dans les cendres :		
Ca en méq/100 g MS	4,0	0,3
Mg — —	15,0	1,0
K — —	0,3	0,1
Na — —	1,1	0,1

La CEC de la tourbe, désignée ici par $\overline{C}$, a été déterminée en fonction du pH en maintenant à chaque fois constante la concentration C du cation : on a choisi, en général, des solutions normales et des sous-multiples décimaux de cette concentration ; à chaque concentration correspond une courbe distincte $\mathcal{C}$.

Pour trois d'entre les cinq cations étudiés, on a tracé en plus la courbe $\mathcal{C}_0$ (concentration saline nulle). La courbe $\mathcal{C}_0$ est « l'enveloppe » de toutes les courbes $\mathcal{C}$ (ANDRÉ, 1975).

c) *Obtention des équilibres entre les phases.*

La réaction d'échange peut être assimilée à une réaction du second ordre. Sa vitesse est fonction exponentielle décroissante du temps : on constate qu'au bout d'une heure, plus de 95 p. 100 des échanges H/M ont eu lieu. L'équilibre est quasiment atteint après 4 heures d'agitation.

Sur chaque suspension, à l'équilibre d'échange, sont effectuées les opérations suivantes :

— séparation des deux phases par filtration sur cellule Millipore,
— mesure du pH et dosage du cation M dans la phase liquide,
— pesée de la phase solide humide. Désorption de $\overline{M}$ par HCl, dosage de M, et correction éventuelle pour tenir compte de la phase liquide retenue.

Remarque 1 : Les échanges dans les solutions normales demandent des précautions particulières pour la détermination précise de M. Nous avons utilisé trois techniques sensiblement équivalentes quant au résultat :

1. On élimine le maximum de la solution 1 N retenue par la phase solide, au moyen d'une centrifugation poussée (ANDRÉ, 1970).

2. On élimine le maximum de la solution 1 N retenue par un lavage de la phase solide avec une solution N/100 de nitrate du même cation. On fait passer deux portions de 20 ml de cette solution sur la tourbe ; la légère hydrolyse provoquée par la dilution, évaluée par l'élévation du pH du percolat, est pratiquement négligeable. En opérant convenablement, la concentration en Cl^- de la deuxième fraction du percolat est inférieure à 10^{-3} N.

3. On amène à la concentration 1 N, par addition de sel, des suspensions correspondant à des points déjà déterminés de la courbe $\mathcal{C}$ (C = N/100). La variation de pH permet de calculer

la quantité $\mathcal{V} \cdot \Delta H$ de protons passés en solution du fait du déplacement de l'équilibre, et par suite, l'accroissement $\overline{\Delta C} = \mathcal{V} \cdot \Delta H/\mathcal{M}$ de $\overline{C}$ pour chacune de ces suspensions.

Remarque 2 : La réaction d'échange $\overline{H} + M \leftrightharpoons \overline{M} + H$ ne peut être notablement déplacée à droite que par l'addition d'anions OH^- dans la phase liquide. Dans le cas où les hydroxydes sont très peu solubles (cas de Mg et de La), on est obligé d'utiliser intermédiairement un hydroxyde soluble, KOH par exemple, en opérant comme suit :

— saturation de la CEC à des niveaux $\overline{C}_1$, $\overline{C}_2$,..., $\overline{C}_i$ par K à l'aide de KOH,
— désorption de $\overline{K}$ par une solution de $MgCl_2$ (ou $LaCl_3$) : la CEC est alors occupée à des niveaux $\overline{C}_i'$ légèrement supérieurs à $\overline{C}_i$ par Mg (ou La) ; séparation des phases,
— mise en équilibre de la tourbe avec des solutions adéquates de $MgCl_2$ (ou $LaCl_3$). Les mesures habituelles sont effectuées à l'équilibre.

On opère de façon que le pH de la phase liquide ne dépasse pas 9 dans le cas de Mg et 7 dans le cas de La, valeurs au-delà desquelles se forment des complexes hydroxylés.

L'emploi d'une résine anionique peut être envisagé pour déplacer directement l'équilibre (1).

d) *Méthodes analytiques.*

Dosage de K par photométrie de flamme Schueknecht.
Dosage de Ca, Mg par complexométrie avec l'EDTA à pH 10 en présence de phtaléine complexone.
Dosage de La par complexométrie avec l'EDTA à pH 6,5 en présence d'orangé de xylénol.
Dosage de NH_4 par acidimétrie après déplacement par NaOH et distillation.
Mesure du pH au pH mètre TS 60 N Tacussel.

RÉSULTATS

Les courbes $\mathcal{C}$, déterminées par points expérimentaux, sont représentées sur les figures 1 à 5. Elles donnent, pour chaque cation métallique, la valeur de la CEC en fonction du pH et de la concentration C du cation dans la phase liquide, soit la relation :

$$\overline{C} = f\,(pH, C)$$

A. — *Précision des points expérimentaux*

— sur l'ordonnée : ± 2 méq.
— sur l'abscisse : ± 0,05 unité de pH.

La phase liquide ne contient pas d'électrolytes faibles, hormis de très petites quantités d'acides humiques et d'acide carbonique ; mais l'échangeur assure à la suspension un effet tampon vis-à-vis des variations du pH : pour le rapport des phases indiqué plus haut (soit environ 5 g de tourbe par litre de solution), cet effet tampon est tel, dans la partie moyenne des courbes, que l'addition de 1 méq/l d'acide ou de base forte fait varier le pH d'équilibre d'environ une unité. Les points expérimentaux sont déterminés après une agitation de la suspension d'une durée de 4 h, à une température voisine de 20°C.

B. — *Caractéristiques des courbes expérimentales*

1. Les courbes $\mathcal{C}$ présentent une forme sigmoïdale d'autant mieux marquée que la valence du cation est plus élevée, et se prolongent par une partie sensiblement linéaire. Mais si l'on explore des valeurs très élevées du pH (voir encart de la fig. 3),

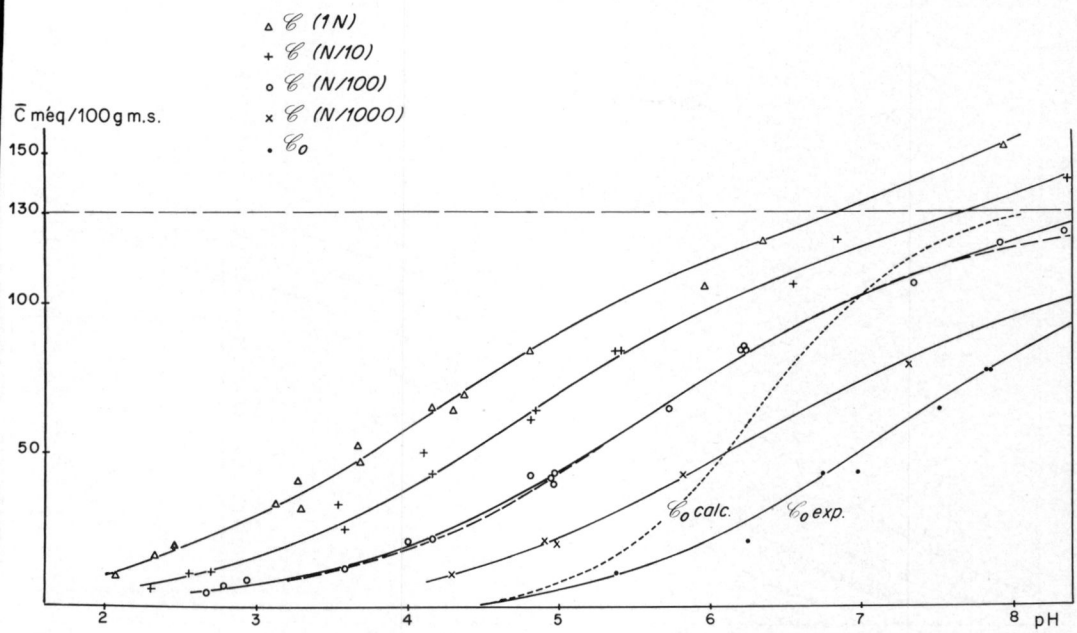


FIG. 1. — *Échange* H/K

Courbes $\mathcal{C}$ donnant la capacité d'adsorption de la tourbe pour l'ion K en fonction du pH de la phase liquide à l'équilibre d'échange H/K et pour des concentrations données de K en solution. En tireté, la courbe $\mathcal{C}$ (10^{-2} N) représentative de l'équation (12) ; en pointillé, la courbe $\mathcal{C}_0$ représentative de l'équation (18).

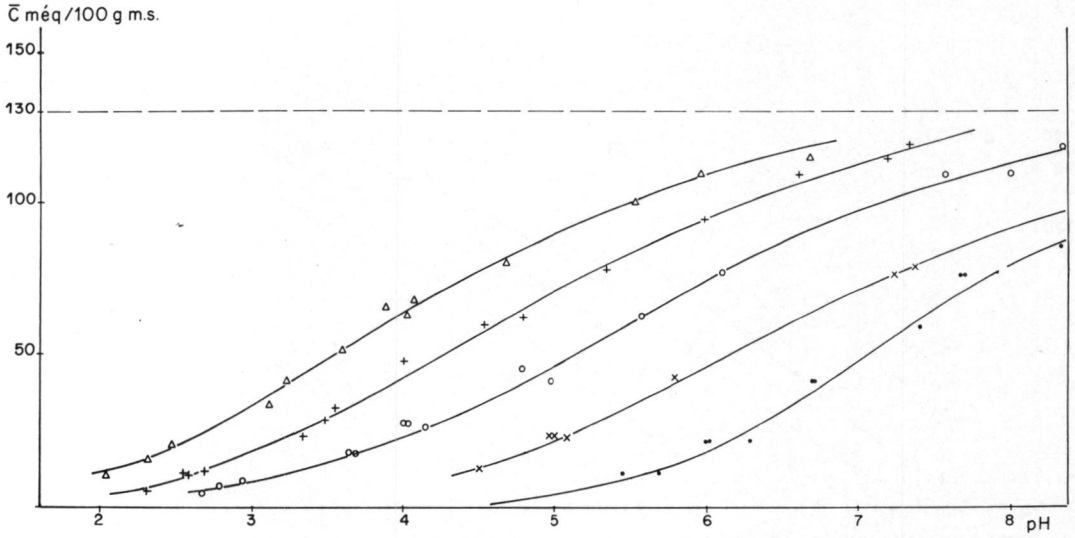


FIG. 2. — *Échange* H/NH_4

(*idem* fig. 1, courbes expérimentales seulement

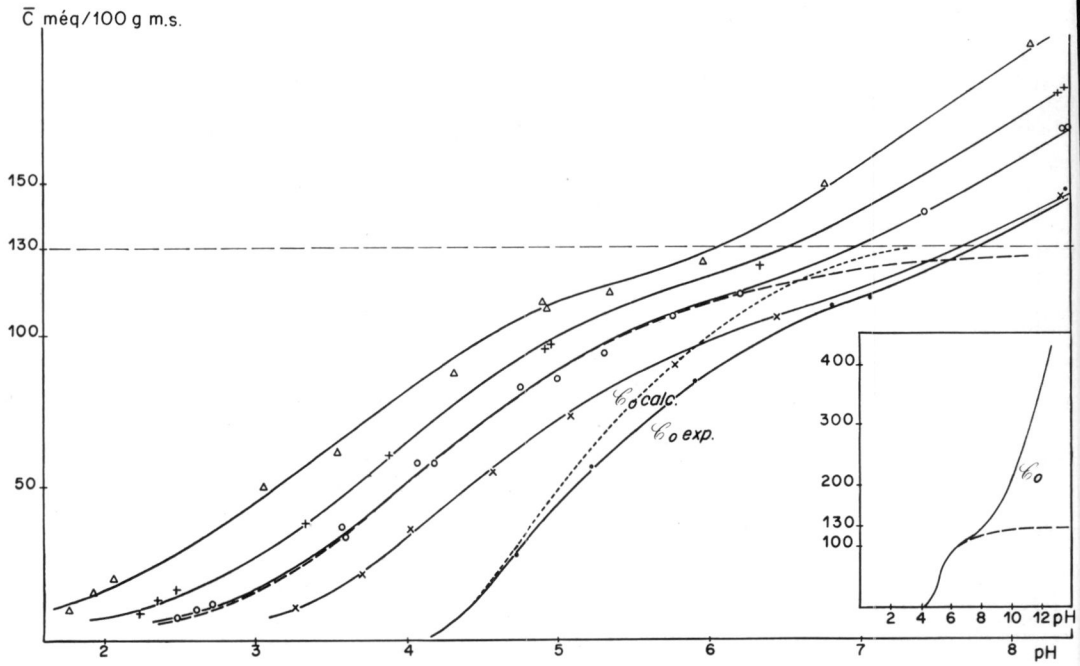


FIG. 3. — *Échange* H/Ca
(*idem* fig. 1)

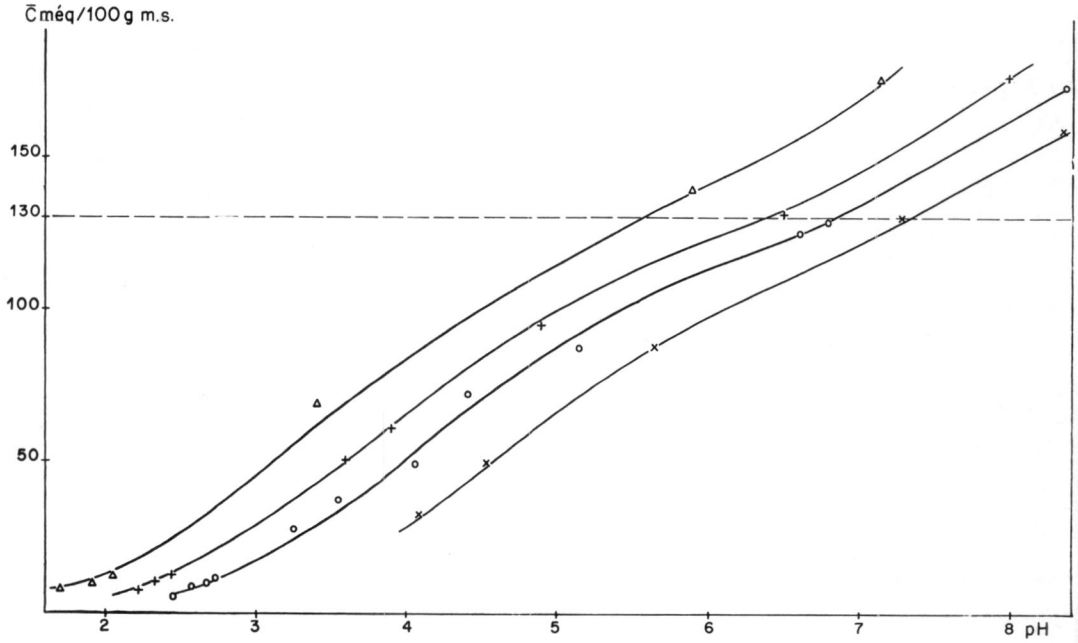


FIG. 4. — *Échange* H/Mg
(*idem* fig. 1, courbes expérimentales seulement)

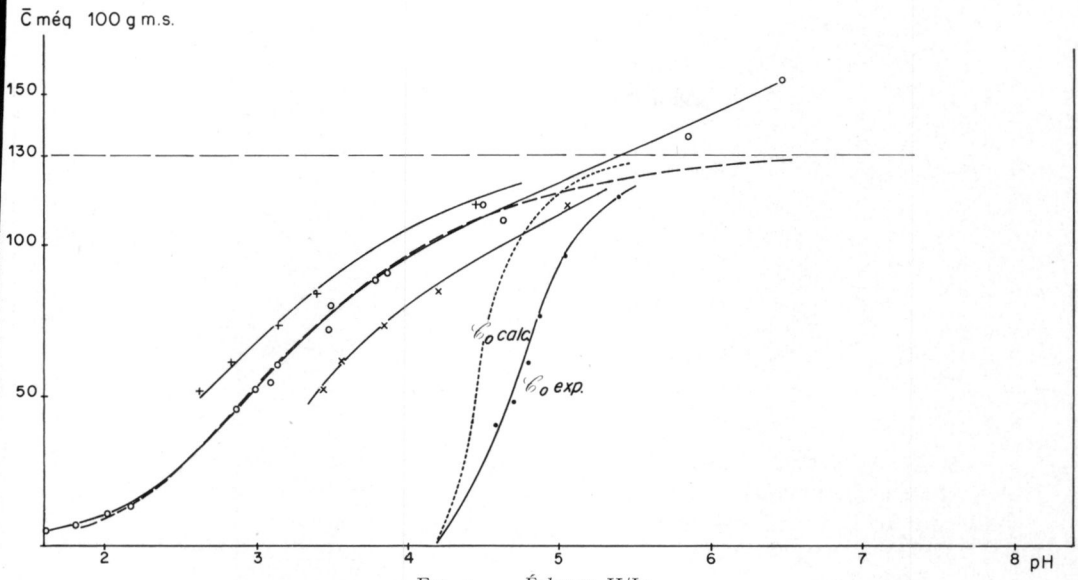


FIG. 5. — *Échange* H/La
(*idem* fig. 1)

on constate que $\overline{C}$ s'élève rapidement à des valeurs de l'ordre de 500 méq, sans qu'on puisse atteindre par ce procédé un palier extrême de saturation. La détermination de la CEC à pH très élevé est d'ailleurs limitée, non seulement par la solubilité des hydroxydes, mais aussi par le risque d'altérer irréversiblement la structure de la tourbe.

2. Les coordonnées du point d'inflexion et la pente des courbes $\mathcal{C}$ en ce point semblent dépendre, pour une concentration C donnée, de la valence du cation (tabl. 2).

TABLEAU 2

Caractéristiques des courbes $\mathcal{C}$ (C = N/100) *pour* K, Ca, La, *au point d'inflexion*

Cation	Ordonnée $\overline{C}$	Abscisse pH	Pente dC/dpH
Potassium	65 ± 2,5	5,60 ± 0,05	35 ± 2,5
Calcium	55 ± 2,5	4,00 ± 0,05	45 ± 2,5
Lanthane	50 ± 2,5	2,95 ± 0,05	55 ± 3,5

3. Pour une même concentration C, les courbes $\mathcal{C}$ de deux cations de même valence sont sensiblement superposables.

4. Les courbes $\mathcal{C}$ d'un même cation se déduisent l'une de l'autre par translation lorsque C varie. Toutes choses égales par ailleurs, la longueur de la translation dépend de la valence (tabl. 3).

TABLEAU 3

Distance en unités pH *entre deux points homologues de deux courbes correspondant aux concentrations*
C = 1 N, N/10, N/100, N/1000

Distance mesurée entre les courbes $\mathcal{C}$	K	NH_4	Ca	Mg	La
C = N/1000 et C = N/100	1,00	1,00	0,50	0,60	0,40
C = N/100 et C = N/10	0,85	0,90	0,40	0,40	0,20
C = N/10 et C = 1 N	0,65	0,70	0,40	0,40	—

5. Les courbes $\mathcal{C}_0$ correspondent à des suspensions ne contenant pas de chlorure : leur tracé et leur position par rapport aux courbes $\mathcal{C}$ dépendent de la légère solubilité des acides humiques et des humates des différents cations.

C. — *Détermination des équations approchées des courbes* $\mathcal{C}$ et $\mathcal{C}_0$

1. *Équation approchée des courbes* $\mathcal{C}$.

Tout équilibre d'échange entre le proton H et un cation M de valence n est correctement défini par la relation thermodynamique :

$$\mathcal{K} = \frac{(\overline{M}) \cdot (H)^n}{(M) \cdot (\overline{H})^n} \tag{2}$$

liant les *activités* des deux ions dans les deux phases. Mais les activités $(\overline{M})$ et $(\overline{H})$ des ions adsorbés n'étant pas mesurables, on est conduit à rechercher des relations de forme analogue liant les concentrations des ions adsorbés aux activités des ions en solution. Or, la relation (2) ne peut décrire les équilibres d'échange que si l'échangeur est monofonctionnel ou considéré comme tel. L'examen des courbes $\mathcal{C}$ conduit à penser que la tourbe possède, comme les acides humiques (FELBECK, 1971), deux fonctions chimiques, radicaux carboxyliques et hydroxyles phénoliques, qui s'ionisent successivement lorsque le pH s'élève : pour l'instant, nous faisons l'hypothèse que l'ionisation de la première est responsable de la forme sigmoïdale des courbes $\mathcal{C}$ dans le domaine de pH étudié : nous déterminerons donc l'équation de ces courbes en considérant que la fonction la plus acide joue le rôle essentiel dans les propriétés d'échange de la tourbe.

Soit $\overline{C}_T$ le nombre total des sites de cette fonction (exprimé en méq pour 100 g de matière sèche).

Soient $\overline{C}$ et $\overline{C}_T - \overline{C}$ les concentrations de $\overline{M}$ et de $\overline{H}$ adsorbés, exprimées dans la même unité.

Soit :
$$\overline{C} = \alpha \overline{C}_T \tag{3}$$

et :
$$\overline{C}_T - \overline{C} = (1 - \alpha) \cdot \overline{C}_T \tag{4}$$

Soient C la concentration en éq/l et γ le coefficient d'activité de M dans la solution.

Compte tenu de (3) et (4) nous écrirons l'expression (2) sous les formes :

$$k = \frac{\overline{C}}{(\overline{C}_T - \overline{C})^n} \cdot \frac{(H)^n}{\gamma \cdot C} \tag{5}$$

ou

$$k = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)^n} \cdot \frac{1}{\overline{C}_T^{(n-1)}} \cdot \frac{(H)^n}{\gamma \cdot C} \tag{6}$$

la constante thermodynamique $\mathcal{K}$ étant remplacée par un coefficient de sélectivité k.

Deux modes de représentation graphique de (5), (6) sont à notre disposition :

— Lorsque k n'est pas très grand ($k < 10$), on peut exprimer la fraction ionique $\overline{x}_M$ ($\overline{x}_M \equiv \alpha$) du cation M dans l'échangeur en fonction de sa fraction ionique x_M dans la solution : cette représentation en diagramme carré conserve la symétrie des phases comme celle des cations (André, 1970).

— Lorsque l'un des cations est beaucoup plus fortement adsorbé que l'autre — cas du proton et d'un échangeur faible —, les courbes $\overline{x}_M f(x_M)$ ne sont plus exploitables. Il est alors commode d'exprimer $\overline{x}_M$ en fonction du colog de l'activité en solution du cation le mieux adsorbé, l'un des paramètres les plus importants de l'échange.

Nous adoptons ici la 2e représentation des variations de $\overline{C}$, ou α, en fonction du pH : dans ces coordonnées, les équations 5 et 6 sont celles d'une sigmoïde, paramétrée par C ; on peut les écrire sous la forme :

$$\log k = \log \frac{\alpha}{(1 - \alpha)^n} - (n - 1) \log \overline{C}_T - n \text{ pH} - \log \gamma C$$

Les dérivées première $\frac{d\text{pH}}{d\alpha}$ et seconde $\frac{d^2\text{pH}}{d\alpha^2}$, calculées en supposant que k reste constant le long d'une courbe $\mathcal{C}$, donnent les coordonnées du point d'inflexion P_0 et la pente en ce point :

Abscisse :

$$\text{pH}_0 = \frac{1}{n} \cdot \log \frac{(1 + \sqrt{n})^{n-1}}{\sqrt{n^n}} - \frac{1}{n} \log k \gamma C \overline{C}_T^{(n-1)} \tag{7}$$

Ordonnée :

$$\overline{C}_0 = \alpha_0 \overline{C}_T = \frac{\sqrt{n} - 1}{n - 1} \cdot \overline{C}_T = \frac{1}{1 + \sqrt{n}} \cdot \overline{C}_T \tag{8}$$

Pente :

$$(d\overline{C}/d\text{pH})_0 = \frac{2{,}30 \cdot n \cdot \overline{C}_T}{(1 + \sqrt{n})^2} \tag{9}$$

On peut remarquer, d'autre part, que l'expression (10), tirée de (6) :

$$\frac{1}{n} \log \frac{\alpha}{(1 - \alpha)^n} = \text{pH} + \frac{1}{n} \log k \gamma C \overline{C}_T^{(n-1)} \tag{10}$$

est l'équation d'une famille de droites parallèles D et de pente égale à 1, quel que soit le cation, dans les coordonnées de la figure 6.

Le tracé de ces droites D permet d'apprécier le comportement réel de l'échangeur et, en particulier, la constance de k : il nécessite la détermination préalable de $\overline{C}_T$.

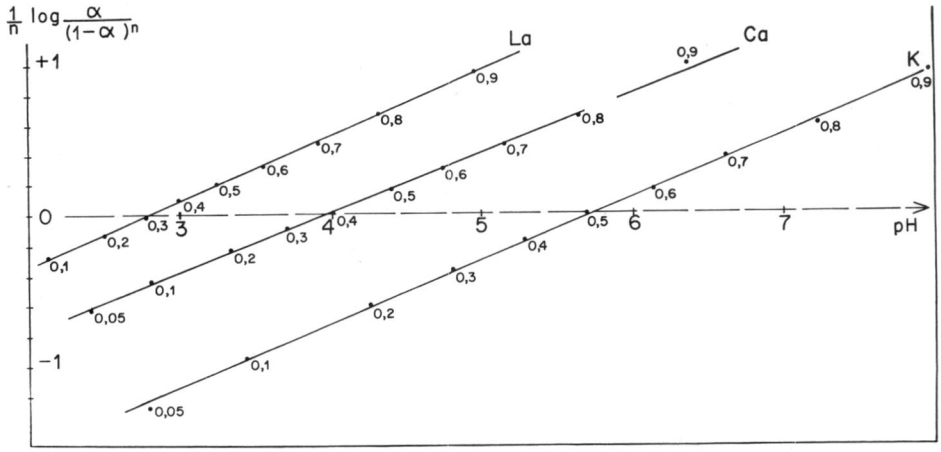


FIG. 6. — *Tracé des droites* D *pour les échanges* H/K, H/Ca, H/La

Valeur numérique de $\overline{C}_T$.

Nous avons identifié les valeurs des ordonnées mesurées de trois points d'inflexion (tabl. 2) avec les valeurs calculées par l'équation (8). Nous trouvons :

— pour K : $\overline{C}_T = 130 \pm 5$ méq/100 g de matière sèche,
— pour Ca : $\overline{C}_T = 133 \pm 5$ — —
— pour La : $\overline{C}_T = 136 \pm 5$ — —

L'accord entre ces trois valeurs nous porte à considérer $\overline{C}_T$ comme une caractéristique intrinsèque de cet échangeur, pratiquement indépendante du cation.

Tracé des droites D (fig. 6).

L'expression $\frac{1}{n} \log \frac{\alpha}{1-\alpha}$ est calculée pour les valeurs :

$$\alpha = 0{,}05\text{-}0{,}1\text{-}0{,}2\text{-}\ldots\ 0{,}9$$
$$n = 1\text{-}2\text{-}3,$$

et portée en fonction des pH mesurés aux points d'ordonnées correspondantes des courbes C.

On obtient effectivement des droites, quasiment parallèles mais de pente $1/q \cong 0{,}4$, nettement inférieure à l'unité. Plusieurs auteurs (KATCHALSKY et SPITNICK, 1947 ; KARREMAN et EISENMAN, 1962 ; POSNER, 1964...) ont déjà observé un tel comportement non idéal de nombreux échangeurs, organiques en particulier, et ont été conduits à établir entre l'activité $\overline{A}$ et la concentration $\overline{C}$ d'un cation adsorbé la relation :

$$\overline{A} = \overline{C}^q \qquad (11)$$

et à considérer l'exposant q comme un coefficient d'interaction répulsive entre les sites d'adsorption ionisés. Cet exposant apparaît d'ailleurs dans les formules classiques de FREUNDLICH, WIEGNER-JENNY, ROTHMUND-KORNFELD etc... (HELFFERICH, 1962).

Compte tenu de ce résultat expérimental, nous modifions les équations (5) à (10) qui deviennent 5 *bis* à 9 *bis* :

$$k = \left[\frac{\overline{C}}{(\overline{C}_T - \overline{C})^n}\right]^q \cdot \frac{(H)^n}{\gamma C} \qquad (5\ bis)$$

$$k = \left[\frac{\alpha}{(1 - \alpha)^n}\right]^q \cdot \frac{(H)^n}{\gamma C} \cdot \frac{1}{\overline{C}_T^{q(n-1)}} \qquad (6\ bis)$$

$$pH_0 = \frac{q}{n} \cdot \log \frac{(1 + \sqrt{n})^{n-1}}{(\sqrt{n})^n} - \frac{q}{n} \log k\gamma C\overline{C}_T^{(n-1)} \qquad (7\ bis)$$

$$\overline{C}_0 = \frac{1}{\sqrt{n} + 1} \cdot \overline{C}_T \qquad (8\ bis)$$

$$(dC/dpH)_0 = 2{,}30 \frac{n\overline{C}_T}{q(1 + \sqrt{n})^2} \qquad (9\ bis)$$

Seule, la valeur de $\overline{C}_0$ est indépendante de q et justifie le choix de l'équation (7) pour la détermination de $\overline{C}_T$.

Valeur numérique du coefficient q.

Les pentes mesurées des droites D diffèrent légèrement d'un cation à l'autre :

Pour K : $q = 2{,}40 \pm 0{,}2$
Pour Ca : $q = 2{,}55 \pm 0{,}2$
Pour La : $q = 2{,}35 \pm 0{,}2$.

Selon OOSAWA, ce coefficient caractéristique de l'échangeur est d'autant plus différent de l'unité que l'interaction entre les sites est plus forte. On constate en effet que la pente $(dC/dpH)_0$ varie comme $1/q$: pour un cation donné, la sigmoïde sera d'autant plus allongée, l'ionisation des sites nécessitera des pH d'autant plus élevés, que le coefficient q sera plus grand.

Valeur numérique du coefficient de sélectivité k.

Les abscisses des points d'inflexion donnés au tableau 2 sont identifiées avec les valeurs calculées au moyen de la relation (7 *bis*).

Les valeurs numériques de γ sont tirées du tableau 4.

TABLEAU 4

Valeurs de logγ (γ : coefficient d'activité du cation) *en fonction de sa valence et de sa concentration dans la solution*

(données par RINGBOM)

	logC = 0	— 1	— 2	— 3
$n = 1$	$\log\gamma = -0{,}20$	$= -0{,}12$	$= -0{,}05$	$= 0{,}0$
$n = 2$	$= -0{,}60$	$= -0{,}40$	$= -0{,}12$	$= 0{,}0$
$n = 3$	$= -1{,}20$	$= -0{,}70$	$= -0{,}30$	$= 0{,}0$

Tous calculs faits, nous trouvons :

Pour K, $\log k_1 = -\ 3{,}60 \pm 0{,}1$;
Pour Ca, $\log k_2 = -\ 11{,}20 \pm 0{,}2$;
Pour La, $\log k_3 = -\ 16{,}10 \pm 0{,}3$.

Les valeurs numériques de $\overline{C}_T$, q, k ont été obtenues à partir des courbes expérimentales $\mathcal{C}(C = 10^{-2}\ N)$ des cations K, Ca, La.

Les équations numériques de ces trois courbes, sous la forme de l'équation (5 *bis*), s'en déduisent :

Pour K : $$10^{-3,60} = \left[\frac{\overline{C}}{\overline{C}_T - \overline{C}}\right]^{2,40} \cdot \frac{H}{10^{-2,05}} \qquad \text{(fig. 1)} \qquad (12)$$

Pour Ca : $$10^{-11,2} = \left[\frac{\overline{C}}{(\overline{C}_T - \overline{C})^2}\right]^{2,55} \cdot \frac{H^2}{10^{-2,12}} \qquad \text{(fig. 3)} \qquad (13)$$

Pour La : $$10^{-16,1} = \left[\frac{\overline{C}}{(\overline{C}_T - \overline{C})^3}\right]^{2,35} \cdot \frac{H^3}{10^{-2,30}} \qquad \text{(fig. 5)} \qquad (14)$$

Les courbes représentatives de (12), (13) et (14) portées en tireté sur les figures 1, 3 et 5 sont quasiment confondues avec les courbes $\mathcal{C}$ expérimentales.

Translation des courbes $\mathcal{C}$: *effet de la concentration* C.

La relation (5 *bis*) montre que si l'on passe d'une concentration C_1 à une concentration C_2, la courbe $\mathcal{C}$ subit une translation parallèlement à l'axe des abscisses, de longueur :

$$\Delta pH = \frac{1}{n}(\Delta pC + \Delta p\gamma) \qquad (15)$$

Les valeurs de ΔpH qu'on peut calculer à partir de (15) et du tableau 4 sont en accord assez satisfaisant avec les valeurs mesurées données au tableau 3.

2. *Équation approchée des courbes* $\mathcal{C}_0$.

La tourbe retient dans une matrice relativement stable une quantité importante de molécules d'acides humiques solubles dans les bases alcalines, et dont une petite fraction se dissout même dans l'eau pure.

L'étude des courbes $\mathcal{C}_0$ doit tenir compte de ce phénomène : on suppose que les acides AH en solution sont partiellement ionisés.
Soit t leur coefficient moyen de dissociation :

$$t = \frac{[A] \cdot (H)}{(AH)} \qquad (16)$$

La neutralité électrique de la phase liquide s'écrit :

$$(H)^+ + C = [A]^- + (OH)^- \qquad (17)$$

C étant, à chaque équilibre la concentration équivalente du cation M dans la phase liquide, variable le long de $\mathcal{C}_0$, croissant avec le pH. Compte tenu de (5 *bis*), il vient :

$$(H)^2 + \left(\frac{H}{k}\right)^{n+1} \cdot \left[\frac{\overline{C}}{(\overline{C}_T - \overline{C})^n}\right]^q = t \cdot [AH] + 10^{-14} \qquad (18)$$

(le coefficient d'activité est pris ici égal à 1, parce que C est faible). Cette équation générale de C_0 pour un cation quelconque du lot choisi, montre que lorsque la tourbe est sous la forme $\overline{H}(\overline{C}_0 = 0)$, la phase liquide a pour pH :

$$pH = -\frac{1}{2} \log (t \cdot [AH] + 10^{-14})$$

Le pH mesuré étant de l'ordre de 4,5, on en déduit que le produit $t \cdot (AH)$ est de l'ordre de 10^{-9} ; ce pH serait égal à 7, si la tourbe était parfaitement insoluble.

Les courbes $\mathcal{C}_0$ calculées avec l'équation (18), lorsque k et q prennent les valeurs numériques précédemment déterminées pour K, Ca, La, sont portées en pointillé sur les figures 1, 3, 5 : il est possible de les comparer aux courbes $\mathcal{C}_0$ expérimentales.

L'écart observé, en particulier avec K, conduit à penser que les points expérimentaux des courbes $\mathcal{C}_0$ ne correspondent pas réellement à des états d'équilibre d'échange : on a noté en effet que le pH des suspensions continue à baisser très lentement avec le temps, l'équilibre étant atteint d'autant plus lentement que la force ionique de la solution est plus faible. Cet écart diminue lorsque la valence du cation augmente.

On notera qu'en chaque point de $\mathcal{C}_0$ (équation 18), la dérivée $d\overline{C}/dpH$ est égale à la dérivée, multipliée par le facteur $(n + 1)/n$, aux points de même ordonnée des courbes $\mathcal{C}$ (équation 9 *bis*) : par suite, les courbes $\mathcal{C}$ relatives aux faibles valeurs de la concentration C, doivent nécessairement rencontrer la courbe $\mathcal{C}_0$ en des points d'ordonnée inférieure à $\overline{C}_T$: ce sont des points limites pour les courbes $\mathcal{C}$. (Le terme « enveloppe » utilisé plus haut au sujet de $\mathcal{C}_0$ n'est pas approprié dans son sens géométrique).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette étude contribue à préciser l'importance des paramètres dont dépendent les échanges cationiques sur la tourbe, et qui sont principalement :

la valence de l'ion,
la concentration de l'ion,
le pH.

A la représentation classique des courbes de titration à force ionique constante, où le pH est donné en fonction de la quantité de base ajoutée, nous avons préféré une représentation graphique qui souligne plus le caractère d'échangeur d'ion que celui d'acide faible, et qui consiste à donner la capacité d'échange en fonction du pH : les courbes $\mathcal{C}$ couvrent ainsi toute la gamme des pH, jusqu'aux valeurs les plus basses. En outre, la forme des courbes $\mathcal{C}$ est indépendante des conditions expérimentales, en particulier des rapports $\mathcal{M}/\mathcal{V}$, contrairement aux courbes de titration.

Il nous a paru utile de distinguer la courbe $\mathcal{C}_0$ de l'ensemble des courbes $\mathcal{C}$ qui se déduisent l'une de l'autre par translation.

Nous nous sommes intéressés aux sites d'échange qui interviennent le plus dans les conditions d'utilisation agronomique de la tourbe : il conviendrait de confirmer par voie chimique qu'il s'agit principalement des radicaux carboxyliques.

Des expériences que nous n'avons pas rapportées ici, montrent que ces radicaux

appartiennent aux molécules humiques solubles en milieu alcalin, mais également à la trame cellulaire insoluble de la tourbe : il conviendra de déterminer la densité de ces sites dans ces fractions, ainsi que les valeurs du coefficient d'interaction q.

L'interprétation théorique très simplifiée est là pour relier entre eux les résultats expérimentaux et faire apparaître le comportement d'échangeur faible de la tourbe, en adoptant le critère selon lequel un échangeur est d'autant plus faible, vis-à-vis d'un cation donné, que la dérivée au point d'inflexion de $\mathcal{C}_0$ est plus petite.

La cinétique des échanges n'a été étudiée que pour définir une durée de réaction conciliant la recherche de l'état d'équilibre et les sujétions matérielles : il semble qu'on ait sous-estimé le temps nécessaire à l'équilibre, dans le cas des échanges avec les cations alcalins à faible force ionique, et commis une erreur par excès sur les abscisses (courbe $\mathcal{C}_0$).

La réversibilité des échanges n'a pas été infirmée : mais cet aspect important du problème mérite une étude particulière.

Comme on le verra par ailleurs, le comportement de la tourbe vis-à-vis des échanges tricationiques $H/M_1/M_2$ est, au moins en partie, implicitement défini par les courbes $\mathcal{C}$.

Ce mode de représentation des échanges paraît susceptible de s'appliquer, non seulement aux tourbes, mais à toute matière végétale, quel que soit son degré d'humification.

Reçu pour publication en janvier 1976.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement Monsieur R. GUENNELON pour l'intérêt qu'il a porté à ce mémoire.

SUMMARY

THE CAPACITY FOR CATION EXCHANGE OF PEAT : TWO-CATION EXCHANGES BETWEEN THE PROTON AND A METALLIC CATION

The two-cation exchanges between the proton H and a monovalent (K or NH_4), a bivalent (Ca or Mg) and a trivalent (La) cation have been studied experimentally on a sphagnum peat. The parameters which determine the capacity for cation exchange are clearly shown through diagrams and an analytical approach.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE FÄHIGKEIT DES TORFS ZUM KATIONENAUSTAUSCH : ZWEIKATIONENAUSTAUSCHE ZWISCHEN DEM PROTON UND EINEM METALLISCHEN KATION

Die Zweikationenaustausche zwischen dem Proton H und einem einwertigen (K oder NH_4), zweiwertigen (Ca oder Mg) und dreiwertigen (La) Kation wurden experimentell auf einen Sphagnumtorf untersucht. Die Parameter, die die Austauschkapazität bestimmen, werden mittel seiner graphischen Darstellung und einer analytischen Annäherung klargestellt.

РЕЗЮМЕ

Катионно-обменные свойства торфа. Бикатионный обмен между протоном и металическим катионом.

Ж. П. АНДРЕ.

Экспериментальное изучение бикатионного обмена между протоном H и моновалентным (K или NH_4), бивалентным (Ca или Mg) и трехвалентным (La) катионом, было проведено на сфагниевом торфе. С помощью графических изображений и аналитического приближения, выявлены параметры от которых зависит емкость обмена.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

André J. P., 1970. Isothermes d'échange ionique sur les sols et réseaux de concentration. *Ann. agron.*, **21** (6), 703-724.

André J. P., 1975. Graphical representation of tricationic exchanges where one of the cations is the proton. *J. Soil Sci.*, **26** (1), 81-92.

Biedermann G., Ciavatta L., 1961. Studies on the hydrolysis of metal ions : the hydrolysis of the lanthanum ion. *Acta Chem. Scand.*, **15**, 1347-1366.

Van Dijk H., 1958. Zur Kenntnis der Basenbindung von Huminsäuren. *Z. Pflanz. Dung. Boden.*, **84**, 150-155.

Felbeck G. T., 1971. Structural hypotheses of soil humic acids. *Soil Sci.*, **111**, 42-48.

Flaig W., 1969. Fortschritte der Huminstoff Chemie. *Landbauforsch. Völkenrode.*

Gilmour J. T., Coleman N. T., 1971. Buffer curves and acid strengh of humic acids and two resins. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35**, 710-714.

Helfferich F., 1962. *Ion Exchange.* Mc Graw Hill, N. Y.

Jacquin F., 1963. *Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution des divers composés humiques.* Thèse. Fac. Sci. Nancy.

Karreman G., Eisenman G., 1962. Electrical potentials and ionic fluxes in ion exchangers I. « *n* type » non ideal systems with zero current. *Bull. Math. Biophysics*, **24**, 413.

Katchalsky A., Spitnick O., 1947. Potentiometric titrations of polymethacrylic acid. *J. Polymer Sci.*, **2**, 432-446.

Oosawa F., 1971. *Polyelectrolytes.* Marcel Dekker inc. New York.

Penningsfeld F., 1973. Provision of nutrient reserves in peat substrates for cultivation. Possibilities. Modes of action. Results. *Symp. artif. media in horticulture.* Ghent.

Posner A. M., 1964. Titration curves of humic acid. *9th Intern. Congr. Soil Sci.*, Bucharest, II. **17**, 161-174.

Puustjarvi V., 1956. On the cation exchange capacity of peats and on the factors of influence upon its formation. *Acta Agric. Scand.*, **6** (4), 411-434.

Puustjarvi V., 1971. The activities of calcium and potassium in water and peat cultures. *Acta Agric. fennica*, **123**, 70-73.

Ringbom A., 1967. *Les complexes en chimie analytique.* Dunod Paris.

Schnitzer M., Skinner S. I. M., 1965. Organo metallic interactions in soils. *Soil Sci.*, **99**, 278-284.

Schnitzer M., Skinner S. I. M., 1969. Free radicals in soils humic compounds. *Soil Sci.*, **108**, 383-390.

Ann. agron., 1976, **27** (1), 33-59.

DÉTERMINATION DES PROFILS D'INDICE FOLIAIRE ET DE RAYONNEMENT DANS UN COUVERT VÉGÉTAL A L'AIDE DE PHOTOGRAPHIES HÉMISPHÉRIQUES FAITES *IN SITU* (1)

R. BONHOMME (2)

Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques des Antilles et de la Guyane, I. N. R. A.,
Domaine Duclos,
97170 Petit-Bourg (Guadeloupe)

RÉSUMÉ

Des photographies hémisphériques prises à un niveau, dans une culture, permettent d'obtenir, pour différentes hauteurs de visée l, la fraction de ciel vue à travers la voûte végétale s_l.

Les précautions à prendre pour l'obtention des clichés sont indiquées, ainsi que différentes méthodes de dépouillement.

Il est montré que pour la hauteur de visée 35° la valeur de s_{35} dépend très peu de la géométrie de la culture et est essentiellement fonction de l'indice foliaire f :

$$f = -2{,}58 \log_{10} s_{35}$$

D'autre part si l'on connaît les rayonnements global et diffus au-dessus de la culture il est possible d'estimer le microclimat lumineux à l'emplacement correspondant au cliché.

La discussion des différentes causes d'erreur est faite dans chaque cas. La comparaison des calculs et des mesures directes est satisfaisante pour les différentes cultures testées : Maïs, Canne à sucre, Vigna, Patate douce.

INTRODUCTION

Le rendement en quantité et qualité d'une production végétale est le fruit de mécanismes physiologiques complexes sur lesquels l'Homme essaie d'agir. Parmi ces processus, l'assimilation nette du gaz carbonique par la culture est un des plus

(1) Le présent article correspond aux principaux résultats d'une thèse de Docteur-Ingénieur soutenue à l'Université d'Aix-Marseille le 5 avril 1974.

(2) Adresse actuelle : Station de Bioclimatologie, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78 000 Versailles.

importants : elle est à l'origine de la production des matériaux organiques nécessaires à la croissance et au développement des plantes. La quantité de gaz carbonique fixée par la plante est un moyen de caractériser la croissance sur un intervalle de temps court.

Un des moyens de déterminer la quantité de CO_2 fixée par la culture est de se placer au niveau des processus physiologiques de photosynthèse et de respiration, de les étudier pour une feuille et de sommer les résultats obtenus d'abord à une tranche de végétation puis à la culture tout entière. L'expérience montre que l'assimilation nette d'une unité de surface de feuille dépend essentiellement de son éclairement. C'est pourquoi cette méthode exige que l'on analyse tout d'abord la répartition de l'énergie solaire entre les feuilles de la culture.

En d'autres termes, il s'agit de déterminer, dans une couche de végétation, la surface des feuilles soumises aux différents éclairements. Sur le dispositif expérimental de la station de Bioclimatologie à la Minière, ces déterminations ont été faites pendant plusieurs années dans une culture de Maïs. Cependant ces études sur les problèmes d'assimilation nette, d'utilisation de l'eau et de microclimatologie doivent conduire à comparer les données obtenues sur une même culture soumise à différents traitements (densité de semis, alimentation hydrique, fumure) ou sur des variétés ou espèces différentes. Il est donc nécessaire de disposer d'une méthode d'étude plus simple que la mesure directe, peut-être moins précise, mais permettant un grand nombre de comparaisons. Ainsi avons-nous été amené à développer la technique des photographies hémisphériques *in situ*, méthode facile à employer mais cependant suffisamment précise dans beaucoup de cas pour l'évaluation simultanée des profils d'indice foliaire et de rayonnement.

Une photographie hémisphérique (fig. 1) prise au sein d'une culture permet de mesurer, pour une hauteur de visée donnée l au-dessus de l'horizon, la part de rayons lumineux qui traverse la voûte végétale sans interception, soit s_l ; cette valeur représente aussi la part de « trous » pour la hauteur considérée. A partir des différents s_l obtenus à un niveau dans une culture, nous nous proposons de déduire :

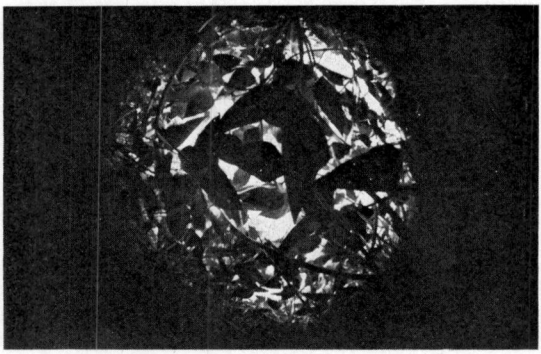
a) *L'indice foliaire total f de la culture au-dessus du niveau de mesure.*

Cet indice folaire total est la surface des feuilles, à laquelle s'ajoute la section des tiges, fleurs, fruits, rapportée à l'unité de surface de sol ; dans beaucoup de cas, cet indice foliaire total est voisin de l'indice foliaire réel (feuilles seules). Certains auteurs avaient établi que, pour une hauteur de visée voisine de 35°, le pourcentage de trous dans la voûte s_l dépendait seulement de l'indice foliaire de la couche de végétation traversée, mais il n'existait pas de méthode de mesure simple de s_l. WARREN WILSON (1963) proposait d'enfoncer obliquement des aiguilles de façon à mesurer le nombre de fois où celles-ci ne rencontraient pas de feuilles. Cette méthode étant difficile à employer (§ 2.2), nous utilisons de façon originale les mesures de s_l obtenues par photographies hémisphériques.

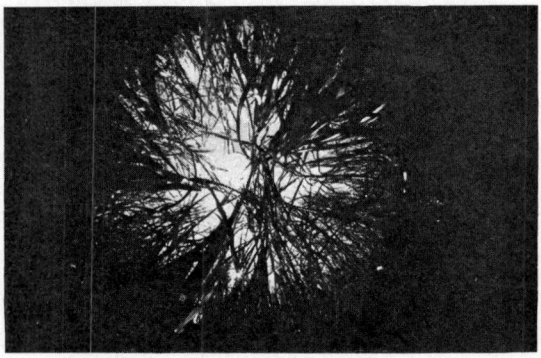
b) *Les rayonnements solaires incidents à ce niveau.*

Depuis la description d'un objectif photographique ayant un angle de visée de 180° par HILL (1924), de nombreux auteurs ont utilisé des dispositifs de photographie hémisphérique pour estimer l'insolation ou l'énergie solaire reçue dans des

A



B



C

FIG. 1. — *Photographies hémisphériques prises sous des cultures de Maïs* (A), *Vigna* (B) *et Canne à Sucre* (C)

constructions, sous forêts, ou quelquefois sous des cultures (SUSUKI et SATOO, 1954 ; EVANS et COOMBE, 1959 ; BROWN, 1962 ; ANDERSON, 1964 ; BECKER, 1971 ; DUCREY, 1975). Cependant les résultats obtenus sont des relations établies sur de longues périodes entre l'insolation ou le rayonnement reçus en un point du couvert et les obstructions mesurées sur le ou les clichés.

Connaissant le climat lumineux au-dessus de la végétation, nous montrons qu'il est possible, à partir d'une série de clichés, d'estimer à chaque instant l'énergie solaire incidente à un niveau. Dans nos estimations nous avons tenu compte de l'énergie interceptée et rediffusée par les feuilles ; ces rayonnements avaient été négligés par les auteurs précédemment cités alors qu'ils ont une part souvent prépondérante dans les cultures assez développées.

Après avoir présenté les précautions à prendre pour la réalisation des clichés ainsi que les méthodes de mesure de s_l, nous utilisons ce résultat pour les estimations de l'indice foliaire f et des rayonnements incidents. Pour chacune de ces déterminations nous avons discuté l'erreur maximale pour une mesure en faisant varier les paramètres, ainsi que l'erreur expérimentale.

I. — RÉALISATION ET DÉPOUILLEMENT DES PHOTOGRAPHIES HÉMISPHÉRIQUES

1. 1. — *Réalisation des clichés*

L'appareil utilisé est un Nikon F équipé d'un objectif « fish-eye Nikkor » (1 : 5, 6 ; 7,5 mm de focale) dont l'angle de visée est de 180°. Les dispositifs de retardement ou de commande à distance de l'obturateur permettent à l'opérateur de se placer hors du champ de visée. Une cellule indépendante dirigée verticalement au-dessus de la culture permet de calculer l'exposition.

Le boîtier de l'appareil photographique est placé sur un support facile à positionner dans la culture ; un petit niveau à bulle permet de bien apprécier l'horizontalité de l'appareil, donc la parfaite verticalité de l'axe optique. Une mire fixée sur la monture de l'objectif donne une visualisation du zénith sur chaque cliché. La hauteur de l'appareil doit aussi être mesurée avec soin afin de bien délimiter une couche horizontale de la culture.

Afin d'accroître le contraste entre les feuilles et le ciel, il faut opérer à l'aube, au crépuscule, ou au cours d'une journée à ennuagement total pour éviter les taches de lumière dues au soleil lui-même ou à des surfaces réfléchissantes du couvert qui rendraient la photo inexploitable. Pour éviter les flous dus au mouvement des feuilles, il convient d'utiliser un film sensible (150 ASA par exemple).

Pour avoir une description complète du niveau considéré, nous avons pris dans la plupart des cas une quinzaine de clichés de façon aléatoire.

1. 2. — *Dépouillement des clichés*

1. 2.1. *Présentation du cliché.*

Un cliché est l'image de l'ensemble de la voûte végétale qui surplombe le niveau de mesure. Il permet donc le calcul de la part de rayons lumineux qui traversent

la végétation sans interception, pour une hauteur et un azimut donnés. Afin d'obtenir une meilleure précision, nous pouvons utiliser non un point, mais la surface élémentaire correspondant à la même hauteur. Nous supposons alors que l'hypothèse H_1 est vérifiée (tabl. 1, p. 41).

Cette hypothèse est valable pour de nombreuses végétations et peut être vérifiée simplement en procédant à un dépouillement de s_l par quadrant. Elle a, en particulier, été vérifiée pour les cultures sur lesquelles portent nos résultats expérimentaux.

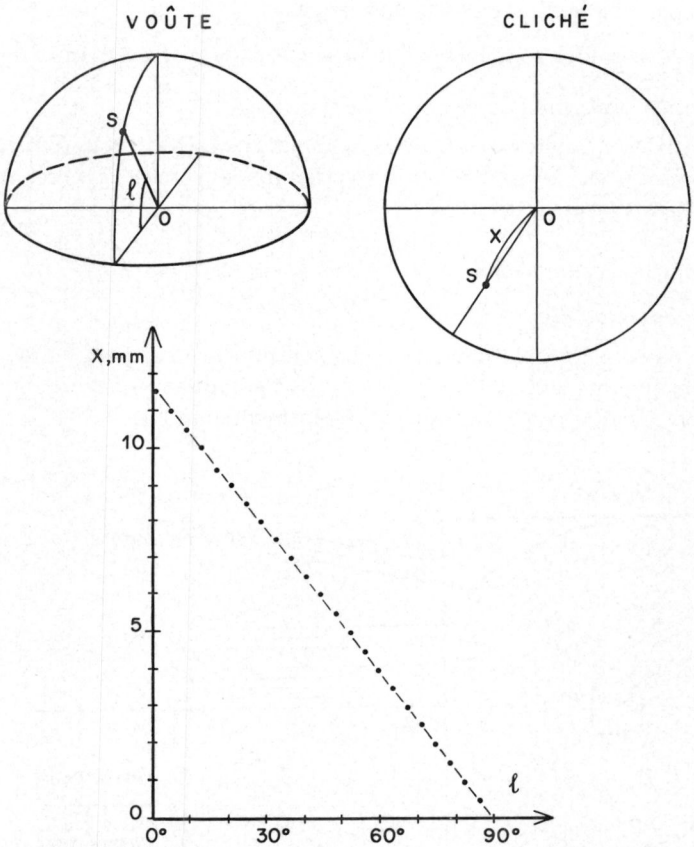


FIG. 2. — *L'appareil photographique étant placé en O, horizontalement et dirigé vers le haut, il est possible, grâce à la relation linéaire entre* X *et l, de connaître sur le cliché la hauteur l d'un point* S

Sur le plan image du négatif, le cliché est un disque de 23 mm de diamètre. Comme le montre la figure 2, il y a, pour l'objectif utilisé, une correspondance quasi linéaire entre la hauteur l d'un point de la voûte et sa distance au centre du cliché X : par exemple le cercle de centre O (zénith donné par l'image de la mire) et de rayon 7,125 mm correspond au parallèle de hauteur $l = 35°$.

Nos dépouillements sont faits par classes de hauteur de 10° et donnent donc les fractions de ciel vues s_l pour neuf couronnes circulaires.

1. 2.2. *Dépouillement manuel.*

Il peut être effectué soit à partir d'un tirage papier, soit à partir de la projection du négatif.

Mesure sur agrandissement.

Le cliché est agrandi et tiré sur papier dur, on peut alors procéder :

— par découpage et pesée des zones de ciel de chaque couronne,
— par planimétrage des taches de ciel.

Ces deux méthodes sont longues mais servent de référence aux suivantes.

Mesure par projection des négatifs.

Le négatif est projeté sur un écran où sont tracés les cercles des hauteurs l à étudier. La mesure des longueurs d'intersection de ces cercles avec des zones de ciel permet d'obtenir s_l (des DIGUERES, 1971).

1. 2.3. *Dépouillement automatique.*

Mesure sur agrandissement.

Comme dans le cas précédent, le cliché agrandi, tiré sur papier dur, et muni de caches correspondants aux différentes couronnes de hauteur, est placé dans un planimètre photoélectrique (type Métraplan, résolution 1 mm²).

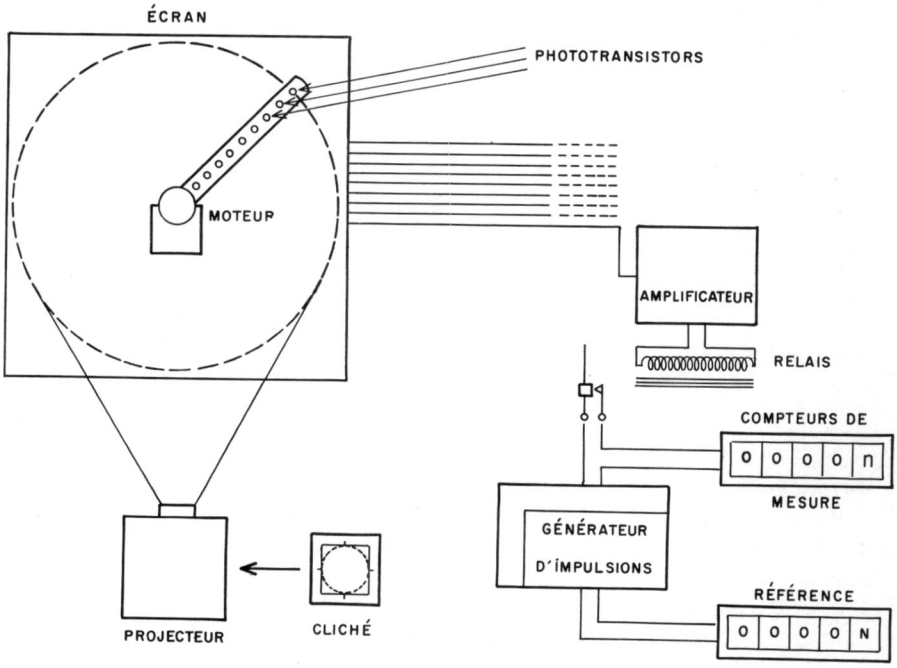


FIG. 3. — *Schéma du dispositif de dépouillement automatique des négatifs de photographie hémisphérique*

Mesure par projection des négatifs (fig. 3).

Nous avons conçu et réalisé un dispositif permettant un dépouillement automatique assez rapide. Le négatif est placé de façon très précise dans un cache pour diapositives (le centre correspond à la hauteur de visée au zénith). Un projecteur à mise au point automatique (Autofocus Prestinox 150 W, quartz-iode) en donne une image agrandie dix fois environ sur un écran. Neuf phototransistors montés sur un bras mû par un moteur (Crouzet) décrivent en deux minutes les cercles correspondant aux neuf hauteurs de visée. Un générateur envoie les impulsions régulièrement espacées qui sont enregistrées par le compteur de référence. A chaque phototransistor correspond un compteur de mesure qui indique le nombre d'impulsions pendant lesquelles le phototransistor est à l'ombre (« tache de ciel » sur le négatif projeté) ; N est le nombre d'impulsions indiqué par le compteur de référence pour une rotation complète. Si n_1 est le nombre indiqué par le compteur de mesure correspondant au phototransistor le plus externe, la surface relative des taches de ciel s_5 est n_1/N.

Des potentiomètres permettent d'obtenir un nombre d'impulsions N élevé (voisin de 500) afin que la précision soit bonne. Après chaque rotation, un interrupteur fixé sur l'écran coupe l'alimentation des compteurs et du moteur au passage du bras, cela permet de noter les valeurs n_1, n_2,..., n_9, N, de remettre les compteurs à zéro, puis de changer de cliché et faire un nouveau dépouillement en sens inverse pour éviter l'enroulement des fils électriques.

2. — DÉTERMINATION DE L'INDICE FOLIAIRE A PARTIR DES PHOTOGRAPHIES HÉMISPHÉRIQUES

2. 1. — *Méthodes de mesure de l'indice foliaire* in situ

De nombreuses méthodes de mesure de l'indice foliaire sont destructives, ce qui est un handicap pour l'étude d'une culture sur une longue période. Comme l'ont rappelé MARSHALL (1968), de PARCEVAUX et CATSKY (1970), KVET et MARSHALL (1971), les principales méthodes de mesure utilisables *in situ* dans un couvert végétal, donc non destructives sont :

2. 1.1. *Méthodes nécessitant la mesure de la surface de chaque feuille.*

Cette mesure peut être effectuée de diverses façons :

— par planimétrage d'une empreinte obtenue sans destruction (pulvérisation non toxique),
— par le comptage des carrés ou des trous recouverts sur une plaque glissée sous la feuille,
— à l'aide des planimètres photoélectriques portatifs (mesure de l'interception d'un flux lumineux),
— par estimation à l'aide de corrélation surface-dimensions linéaires,
— par estimation à l'aide de comparaison à des feuilles standard ou à des formes géométriques simples.

2. 1.2. *Méthodes d'estimation de l'indice foliaire par tranche de végétation.*

WARREN WILSON (1959, 1963 *a* et *b*) a développé une méthode de calcul de l'indice foliaire d'une couche de végétation à partir de « points quadrats » inclinés. En enfonçant dans la culture une aiguille inclinée sur l'horizontale suivant un angle l, il est possible de mettre en relation le nombre de contacts aiguille feuilles avec l'indice foliaire dans une couche horizontale. La méthode de calcul suppose que l'azimut des feuilles (angle entre les deux plans verticaux passant par leur normale et par le soleil) ne prend pas de valeurs privilégiées. La précision dépend respectivement :

— de l'inclinaison des feuilles,
— de l'inclinaison de l'aiguille.

2. 2. — *Intérêt de cette technique de mesure de l'indice foliaire*

Le premier type de mesure est très long à mettre en œuvre car il nécessite :
— une délimitation précise d'un volume de mesure,
— une mesure ou une estimation de la surface de chaque feuille (ou de chaque partie de feuille) comprise dans ce volume,
— la sommation des surfaces ainsi obtenues pour avoir, dans la couche, la surface foliaire.

La technique de WARREN WILSON est très séduisante car il suffit de délimiter une couche (ou une profondeur d'enfoncement de l'aiguille), et de calculer l'indice folaire à partir du nombre de contacts aiguille-feuilles. Il faut toutefois signaler que :

— la mise en place du système de déplacement de l'aiguille selon une inclinaison donnée est difficile, particulièrement pour des cultures de grande taille ;

— l'automatisation de la mesure nécessite un appareillage lourd, puisqu'il faut à la fois un indicateur de contact et de plus un système électrique pour déplacer et enregistrer la position de la sonde.

Notre méthode de mesure dérive de celle de WARREN WILSON et en a les avantages. Mais pour éviter d'avoir un système mécanique délicat nous mesurons la part de rayons lumineux ayant une certaine inclinaison l et traversant la voûte végétale sans interception, soit s_l. La mesure est donc optique, elle est faite sur des photographies prises sous ou au sein de la culture. L'inconvénient de cette méthode qui oblige à opérer en l'absence de soleil est compensé par la possibilité de différer les dépouillements. Nous avons vu (§ 1. 2.3) qu'une automatisation peut être réalisée, ce qui rend la mesure plus rapide.

Avant d'exposer la méthode de calcul de l'indice foliaire à partir des s_l obtenus par photographie, il est nécessaire de rappeler les lois théoriques sur lesquelles elle s'appuie.

2. 3. — *Lois théoriques de variation de s_l en fonction de l'indice foliaire*

De nombreux auteurs ont étudié de façon théorique la probabilité de passage d'un rayon lumineux, incliné sur l'horizontale selon l'angle l (hauteur), à travers une couche végétale d'indice foliaire f, constituée de feuilles d'inclinaison i : MONSI

et SAEKI (1953), COWAN (1968), ROSS (1968), ISOBE (1969). L'utilisation des points quadrats a conduit aussi à des études analogues sur la probabilité de contact d'une aiguille inclinée (WARREN WILSON, 1960).

CHARTIER (1966) a étudié les variations théoriques des taches de ciel en fonction de l'inclinaison des feuilles et de la hauteur de visée : reprenons ici ses résultats sans les démontrer. Ceux-ci font intervenir des hypothèses regroupées dans le tableau 1. On a vu (§ 1. 2.1) que l'hypothèse H_1 est généralement valable. On supposera par la suite qu'elle est vérifiée. S'il n'en est pas ainsi, un dépouillement par secteur s'impose et le nombre de clichés doit être accru.

TABLEAU I

Énoncé des différentes hypothèses

Hypothèse H_1	A partir d'un point de la culture, la probabilité de voir, à travers le feuillage, un point du ciel de hauteur donnée est indépendante de l'azimut.
Hypothèse H_2	L'azimut des feuilles a la même probabilité de prendre n'importe quelle valeur de 0 à 2π ; autrement dit, il n'y a pas d'azimuts privilégiés.
Hypothèse H_3	La probabilité de présence d'une feuille en un point donné d'une couche ne dépend pas de la position de ce point, que ce dernier soit dans une tache de soleil ou dans une zone d'ombre ; autrement dit, il n'y a pas de superpositions privilégiées.
Hypothèse H_4	L'inclinaison i est la même pour toutes les feuilles.
Hypothèse H_5	Les facteurs de réflexion et de transmission des feuilles T sont égaux.
Hypothèse H_6	Les rayons lumineux diffusés par les feuilles n'ont pas de direction privilégiée.

Dans les cas où les hypothèses H_2 et H_3 sont vérifiées, les formulations théoriques de s_l sont assez simples mais diffèrent selon que H_4 est vérifiée ou non. Les hypothèses H_5 et H_6 n'interviennent pas dans la détermination de f.

2. 3.1. *Cas où l'hypothèse H_4 est vérifiée.*

Si un couvert végétal répond de plus à l'hypothèse H_4, CHARTIER a montré que l'on a la relation :

$$s_l = e^{-K(i,\, l) f} \tag{1}$$

s_l est la part de ciel vue à travers la culture pour la hauteur de visée l, f est l'indice foliaire de la culture surplombant le niveau de mesure, K (i, l) est fonction de i, inclinaison des feuilles, et l, hauteur de visée (fig. 4).

2. 3.2. *Cas où l'hypothèse H_4 n'est pas vérifiée.*

Dans le cas d'une végétation dont les feuilles ont des inclinaisons variables mais qui répond à H_2 et H_3 (et non à H_4), on a également une relation du type :

$$s_l = e^{-\mu_l \cdot f} \tag{2}$$

avec $\mu_l = \sum_l \{p(i).\ K(i, 1)\}$, où $p(i)$ représente la fréquence des feuilles d'inclinaison i.

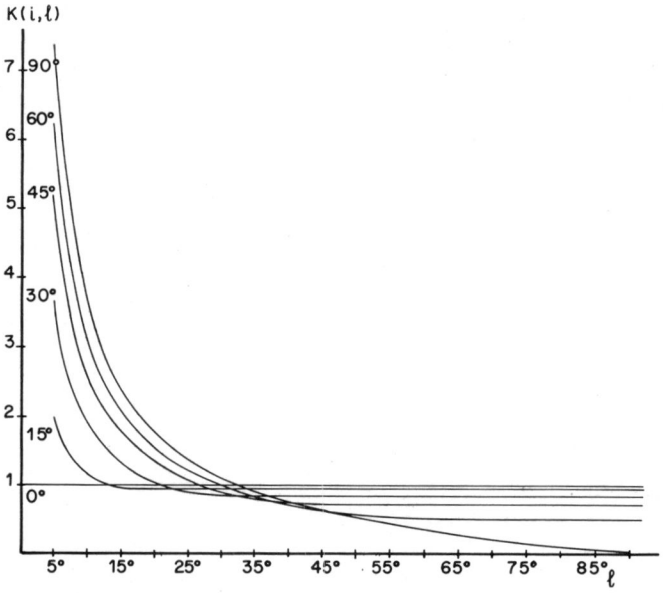


FIG. 4. — *Variations de* K (*i*, *l*) *« fonction d'extinction » des zones de ciel vues d'un point à travers une culture dont les feuilles ont différentes inclinaisons constantes i, en fonction de la hauteur de visée l.*

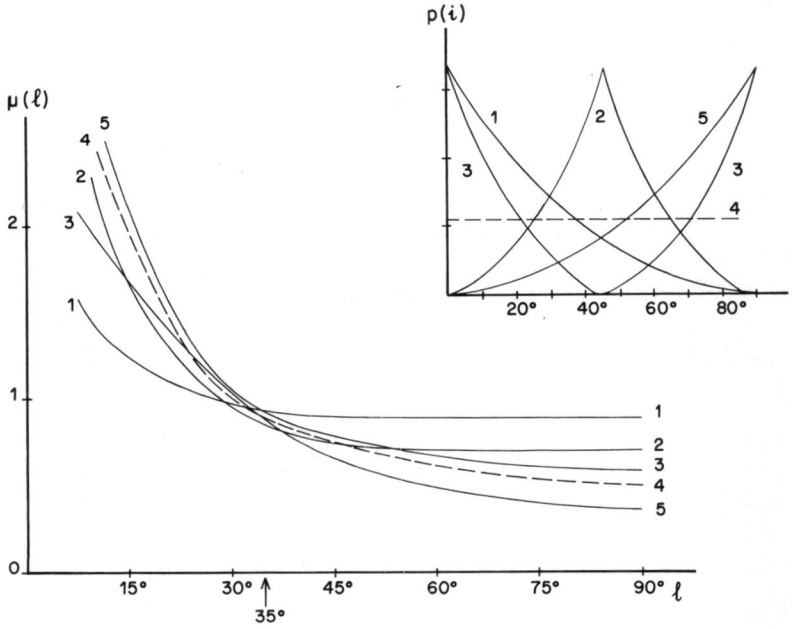


FIG. 5. — *Variation de* μ (*l*) *« fonction d'extinction » des zones de ciel vues d'un point à travers une culture en fonction de la hauteur de visée l pour des couverts végétaux dont les feuilles ont des probabilités d'inclinaison p* (*i*) *différentes* (LEMEUR, 1970)

1 : Couvert planophile
2 : Couvert plagiophile
3 : Couvert extrémophile
4 : Couvert « randomly »
5 : Couvert érectophile

La figure 5 (d'après LEMEUR, 1970) montre les variations des fonctions μ_l pour des couverts végétaux ayant des géométries différentes :

— type planophile à feuilles de préférence horizontales (trèfle blanc, pomme de terre) ;
— type érectophile à feuilles dressées (jeunes fourrages) ;
— type plagiophile à feuilles de préférence obliques (betterave) ;
— type extrémophile à feuilles de préférence non obliques ;
— type « randomly » dont les feuilles n'ont pas d'inclinaisons privilégiées.

2. 4. — *Calcul de l'indice foliaire à partir de s_l*

Nous allons maintenant montrer comment, à partir des photographies hémisphériques (qui donnent les variations de s_l en fonction de l) et des lois théoriques de variation de s_l précédemment rappelées, il est possible de calculer l'indice folaire f de la couche de culture à travers laquelle les clichés ont été effectués.

Dans le cas où H_2, H_3 et H_4 sont vérifiées, la figure 4 montre que les fonctions K (i, 35°) sont pratiquement indépendantes de i et ont des valeurs voisines de 0,9 ($\pm$ 0,1). Il s'ensuit que l'on peut utiliser la relation (§ 2. 3.2) pour calculer l'indice foliaire f à partir de $s_{l=35°}$ (que nous noterons $s_{35°}$) ; cette relation :

$$s_{35} = e^{-K(i,\,35)f}$$

peut s'écrire :

$$\mathrm{Log}_e\, s_{35} = -\,0{,}9f$$

soit :

$$f = -\,1{,}12\ \mathrm{Log}_e\, s_{35}$$

ou encore :

$$f = -\,2{,}58\ \log_{10} s_{35} \qquad (3)$$

Pour tenter d'obtenir une meilleure précision, nous avons aussi essayé des combinaisons de mesures de s_l pour différentes hauteurs de visée donnant des variations minimales en fonction de i. Si, théoriquement, ces formules existent, elles n'apportent pas en pratique une meilleure précision, aussi ne les présenterons nous pas dans ce travail.

On voit sur la figure 5 que pour $l = 35°$, μ est pratiquement indépendant de i ; la même formule de calcul (3) peut donc être étendue au cas de couverts semi-hétérogènes à feuilles de différentes inclinaisons (H_2 et H_3 seules vérifiées).

2. 5. — *Précision sur le calcul de l'indice foliaire*

Nous examinerons l'erreur maximale obtenue en faisant varier les paramètres ainsi que l'erreur expérimentale.

2. 5.1. *Approche théorique de l'erreur.*

La précision sur le calcul de f dépend :

— de l'approximation due à la formule,
— de la précision de la mesure de s_l,
— de la validité des hypothèses pour les cultures considérées.

2. 5.1.1. *Erreur apportée par la formule.*

Lors de l'établissement de la formule de calcul (3), nous avons vu que celle-ci introduit un coefficient qui varie légèrement avec l'inclinaison des feuilles. En fait, des calculs effectués sur des couverts végétaux théoriques à géométrie très différente (§ 2. 4.) montrent que l'erreur maximale sur f, due à l'incertitude sur K (i, 35), n'excède pas 5 p. 100.

2. 5.1.2. *Erreur due à l'indétermination sur s_l.*

En dérivant la formule (3) :

$$\Delta f = -1{,}12\ (\Delta s_{35}/s_{35})$$

on voit que l'erreur absolue sur f est proportionnelle à l'erreur relative sur s_{35}. Δs_{35}, lié au mode de dépouillement, étant assez constant, $\Delta s_{35}/s_{35}$ augmente lorsque s_{35} diminue, donc lorsque f augmente. L'erreur relative sur f doit donc être approximativement indépendante de f.

2. 5.1.3. *Erreurs lorsque* H_2 *et* H_3 *ne sont pas vérifiées.*

Pour la plupart des cultures que nous avons testées, il ne semble pas qu'il existe d'azimuts privilégiés ; cependant, pour des plantes dont les feuilles présentent un certain phototropisme, cet effet ne peut être négligé (H_2 non vérifié). Comme l'a montré LEMEUR (1970), il est possible de calculer théoriquement l'influence d'une répartition en azimut non aléatoire sur les fonctions μ_l (relation 2), donc sur les calculs d'indice foliaire. Nous nous limiterons à un exemple concernant le maïs. En supposant un indice folaire $f = 100$, nous avons calculé ce que donnerait la méthode des photographies dans les deux cas suivants :

a) toutes les feuilles sont perpendiculaires à la direction du soleil ;

b) elles sont toutes parallèles ;

on trouve alors des indices foliaires respectifs de 0,96 et 1,10. Ces évaluations sont des extrêmes, et dans la pratique, on se trouve entre les deux valeurs : l'erreur due au non respect de H_2 reste donc faible.

TABLEAU 2

Valeurs expérimentales de α *obtenues sur deux cultures*

Le calcul de s_{35} est fait sur 15 clichés ; $f = \alpha \log_{10} s_{35}$

Canne à sucre		Vigna	
Indice foliaire f	α	Indice foliaire f	α
1,73	— 2,99	1,9	— 1,54
2,88	— 2,99	3,2	— 1,56
4,5	— 3,47	3,62	— 1,56
5,3	— 3,70		

Le coefficient — 2,58 de la relation 3 a été établi en supposant que les superpositions sont aléatoires (hypothèse H_3). Ce n'est pas toujours le cas : certaines plantes comme le Vigna cherchent à « boucher les trous » ; le coefficient est alors inférieur

en valeur absolue ; pour d'autres, comme la Canne à sucre, les feuilles inférieures se mettent à l'ombre des feuilles supérieures et le coefficient est alors supérieur en valeur absolue (tabl. 2).

2. 5.2. *Erreur expérimentale.*

Nous avons choisi des mesures faites sur des couverts végétaux de structure très différente : Maïs ou Canne à Sucre (port dressé, grande taille) et Patate douce ou Vigna (port horizontal, culture peu élevée).

2. 5.2.1. *Précision sur s_l.*

Influence de l'hétérogénéité et de la taille de la culture.

Une hétérogénéité dans le plan horizontal (effet de rangs par exemple) oblige à faire un nombre plus important de clichés afin d'obtenir des valeurs moyennes de s_l suffisamment représentatives.

Un autre facteur qui conditionne la précision de la mesure est la taille des feuilles et la distance objectif organes foliaires : de grandes feuilles ou des feuilles placées près de l'appareil photographique (voûte foliaire basse) nécessitent plus de clichés que de petites feuilles ou des feuilles éloignées de l'objectif. Dans une culture de grande taille (maïs), les distances feuilles-appareil sont statistiquement plus élevées que dans le cas d'une culture basse (patate douce). Le tableau suivant (tabl. 3) montre que, pour un indice foliaire voisin, on a, avec le même nombre de clichés, une erreur relative sur la moyenne plus élevée dans la culture de petite taille.

TABLEAU 3

Moyenne et erreur relative sur la moyenne R *obtenues avec des cultures de Maïs et de Patate douce pour différentes hauteurs de visée l*

24 photographies. R = 2 $\sigma_{\bar{s}}/s_l$; $\sigma_{\bar{s}}$: erreur type sur la moyenne

	l = 15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°
Maïs (f = 2,8)	s_l = 0,009	0,056	0,120	0,185	0,220	0,252	0,376	—
	R = 0,22	0,11	0,12	0,12	0,14	0,16	0,12	—
Patate (f = 2,8)	s_l = 0,027	0,062	0,085	0,113	0,176	0,150	0,226	0,197
	R = 0,30	0,28	0,22	0,24	0,25	0,25	0,41	0,53

Influence de l'indice foliaire et de la hauteur de visée.

Pour une hauteur de visée moyenne (l = 35° par exemple), la précision de la mesure varie en fonction de l'indice foliaire de la couche surmontant l'appareil. Les données du tableau 4, obtenues dans une culture de maïs, montrent que, lorsque l'indice foliaire diminue, l'erreur relative sur la moyenne s_{35} diminue également. En effet, pour des indices foliaires élevés, une petite erreur absolue conduit à une

erreur relative non négligeable compte tenu des faibles valeurs de s_l ; dans ce cas, la méthode de dépouillement par négatif projeté devient peu fiable (taches de ciel petites par rapport à la taille des phototransistors).

TABLEAU 4

Moyenne s_l et erreur relative sur la moyenne R *obtenue pour une même hauteur de visée $l = 35°$ selon l'indice foliaire*

Maïs : 24 photographies

Indice foliaire de la couche photographiée	3,4	3,1	2,8	2,0	1,7	0,9	0,1
s_l	0,050	0,060	0,120	0,171	0,195	0,540	0,931
R	0,20	0,20	0,12	0,13	0,17	0,08	0,03

Choix du nombre de clichés.

Seule l'expérience peut nous renseigner sur le nombre de mesures à effectuer pour obtenir une précision donnée. Une première estimation avec beaucoup de clichés, nous donne une idée de ce nombre puisque l'on sait que l'écart-type sur la moyenne est inversement proportionnel à la racine carrée du nombre de mesures.

2. 5.2.2. *Calculs d'indice foliaire.*

Afin de vérifier la méthode, nous avons fait une série de comparaisons entre l'indice foliaire déterminé par mesure directe au champ et par le calcul à partir des photographies hémisphériques avec la valeur de α théorique (formule 3).

TABLEAU 5

Comparaison des indices foliaires cumulés estimés ou mesurés

	Indice foliaire calculé		Indice foliaire mesuré	
	Intervalle de confiance	Valeur moyenne	Valeurs extrêmes	Valeur moyenne
Patate douce (30 photographies)	2,2-3,1	2,6	2,6-3,1	2,8
Maïs (16 photographies par niveau)				
Niveaux 0,30 m .	2,7-3,8	3,1	2,7-3,1	2,9
0,60 m .	2,0-2,8	2,4	2,3-2,7	2,5
0,90 m .	1,7-2,4	2,0	1,8-2,1	2,0
1,20 m .	0,8-1,2	1,0	1,3-1,5	1,4

Cas général.

Il convient de rappeler que l'indice foliaire mesuré par photographie hémisphérique comprend les surfaces des feuilles mais aussi les sections de tiges, épis, fleurs. Dans chaque calcul nous avons tenu compte de l'erreur relative sur s_l (en prenant un intervalle de confiance de 95 p. 100 : $s_l \pm 2\,\sigma_s$), mais aussi des coefficients extrêmes des formules.

L'indice foliaire est mesuré par ailleurs par planimétrage direct des feuilles et des sections de tiges et épis sur trois parcelles de 1 m² voisines du lieu d'obtention des clichés. Les calculs donnent des valeurs voisines de celles des mesures sauf pour le niveau 1,20 m pour lequel l'effet de rang se fait sentir, ce qui remet en cause l'hypothèse H_1 (tabl. 5).

Cas des indices foliaires faibles.

Dans ce cas l'hétérogénéité oblige à faire un très grand nombre de clichés. Pour éviter cela, nous avons utilisé (BONHOMME *et al.*, 1974) des photographies faites au-dessus de la culture avec un appareil photographique dirigé vers le bas. Les calculs sont identiques au cas des taches de ciel mais sont basés sur les zones de sol vues à travers la végétation pour différentes hauteurs de visée. Des résultats obtenus sur deux cultures très différentes pour des indices foliaires inférieurs à 1 sont présentés dans le tableau 6 et montrent la bonne précision de la méthode. La mesure directe de l'indice foliaire est faite dans ce cas par planimétrage des feuilles de dix pieds.

TABLEAU 6

Indices foliaires faibles évalués par photographies hémisphériques dirigées vers le sol
s_l est calculé sur 15 clichés

	Indice foliaire évalué		Indice foliaire mesuré
	Intervalle de confiance	Valeur moyenne	
Canne à sucre	0,03-0,06	0,04	0,05
	0,12-0,18	0,15	0,18
	0,46-0,68	0,56	0,48
	0,76-1,26	0,98	1,00
Vigna	0,03-0,06	0,04	0,04
	0,06-0,10	0,08	0,10
	0,29-0,47	0,37	0,41
	0,95-1,30	1,11	0,98

2. 6. — *Conclusion*

Les photographies hémisphériques faites à un niveau dans une culture nous donnent les parts de ciel vues à travers la voûte végétale pour différentes hauteurs de visée l, soit s_l.

A l'aide de la formule établie, il est possible de calculer directement l'indice foliaire f de la couche surmontant le niveau de mesure. La précision obtenue sur f peut être évaluée, compte tenu de la précision sur s_l et en supposant vérifiées les hypothèses 1, 2, 3. Il ressort de l'étude des erreurs maximales et expérimentales que cette méthode de calcul peut conduire à une bonne évaluation de l'indice foliaire f.

Toutefois, il est nécessaire de tester la possibilité d'appliquer ce mode de calcul à la culture étudiée (afin d'être certain que le couvert végétal réponde aux hypothèses 1, 2, 3) : cela peut être fait par comparaison des résultats d'une estimation avec une mesure directe préliminaire.

3. — ÉVALUATION DU MICROCLIMAT LUMINEUX A PARTIR DES PHOTOGRAPHIES HÉMISPHÉRIQUES

Ces photographies hémisphériques faites dans une culture nous permettent de mesurer l'importance des « trous » dans la voûte végétale s_l pour les différentes hauteurs de visée l. Connaissant le climat lumineux au-dessus du couvert végétal, il est possible de calculer, à l'aide des clichés, le microclimat lumineux au niveau de mesure considéré.

3. 1. — *Rappels sur les rayonnements d'origine solaire*

Le rayonnement d'origine solaire mesuré au sol sur un plan horizontal se présente sous deux formes :

— la composante verticale du rayonnement solaire direct ($I \sin h$),
— le rayonnement diffusé par le ciel D.

Il est nécessaire de calculer séparément les influences des rayonnements directs et diffus. Ces derniers sont mesurés à l'aide de deux pyranomètres, l'un mesurant le rayonnement global ($G = I \sin h + D$), l'autre équipé d'une bande pare-soleil de Schuepp mesurant D seul.

La pénétration du rayonnement solaire direct I est un problème de géométrie pure puisqu'on peut calculer avec précision la position du soleil (h et θ). Celle du rayonnement diffus est plus complexe car il est essentiellement variable dans le temps et dans l'espace. Nous considérerons deux cas particuliers correspondant à des modèles de répartition énergétique déjà étudiés par divers auteurs.

3. 1.1. — *Lois de répartition des luminances du ciel.*

a) Par ciel couvert, WALSH (1961) suppose la luminance constante quel que soit le point de la voûte considéré. Nous désignerons ce cas, en accord avec ANDERSON (1966), par UOC (uniform overcast sky).

En fait, la luminance d'un ciel couvert varie avec la hauteur de la zone de ciel considérée. MOON et SPENCER (1942) ont proposé la loi de variation suivante :

$$L_l = L_{90} (1 + 2 \sin l)/3$$

où L_l est la luminance de la zone sphérique de ciel de hauteur l,
L_{90} est la luminance du ciel au zénith.

Nous désignerons ces conditions par le terme SOC : standard overcast sky.

b) Par ciel serein, la luminance d'une zone de ciel dépend non seulement de sa hauteur, mais aussi de son azimut par rapport au soleil. Divers auteurs ont proposé des fonctions de répartition des luminances, en particulier : DOURGNON et GODFERT (1965), KITTLER (1967), DOGNIAUX (1973).

3. 1.2. *Calcul de l'éclairement diffus reçu sur un plan horizontal.*

Si les différents points de la voûte du ciel ont une luminance variable L, l'éclairement diffus reçu sur une surface horizontale est :

$$D = \int_{\theta = 0}^{\theta = 2\pi} \int_{l = 0}^{l = \pi/2} L \cos l \sin l \, dl \, d\theta$$

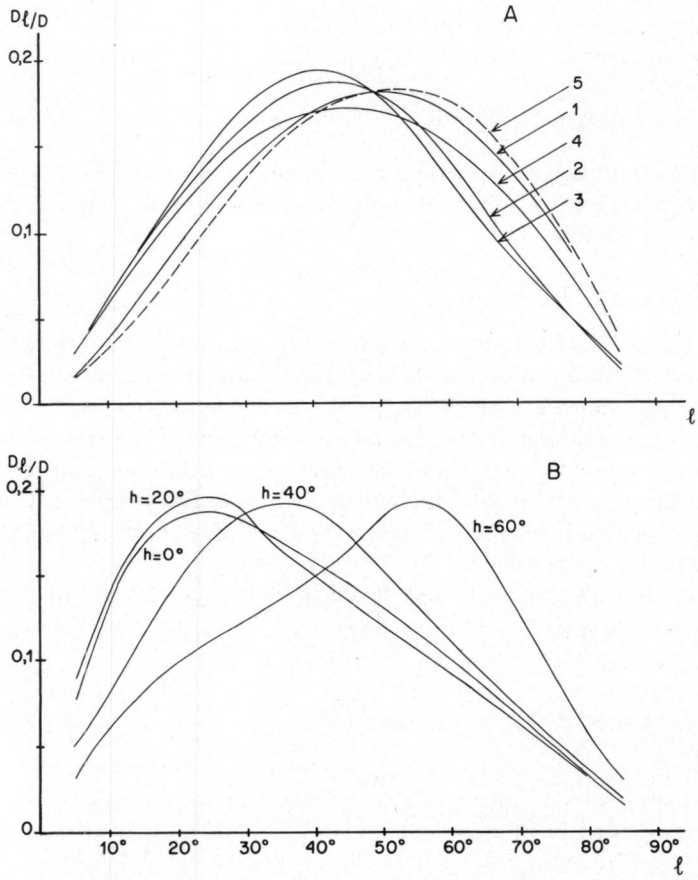


FIG. 6. — *Part d'énergie fournie sur un plan horizontal par chaque couronne circulaire de la voûte du ciel de hauteur l et de $\Delta l = 10°$*

A : Ciel couvert

1 : Ciel couvert
2 : Ciel partiellement couvert
3 : Légers nuages
4 : UOC
5 : SOC

B : Ciel clair, différentes hauteurs de soleil *h*

Nous appelons D_l l'éclairement énergétique fourni par une zone sphérique de ciel de hauteur Δ_l, située à un angle l au-dessus de l'horizon. Il est alors facile de caractériser la contribution de chaque couronne de ciel par le rapport D_l/D. La figure 6 montre, pour des intervalles $\Delta l = 10°$, la valeur de ce rapport en fonction de l pour les lois de répartition de luminance énoncés précédemment (UOC, SOC) ainsi que les résultats expérimentaux obtenus par le Comité National Belge de l'Éclairage ou C.N.B.E. (1964).

3. 2. — *Méthode de calcul du microclimat lumineux dans la culture*

Dans une culture, l'énergie solaire reçue à un niveau est composée de trois termes :

— le rayonnement solaire direct à l'emplacement des taches de soleil,
— le rayonnement diffusé par le ciel et qui pénètre par les trous de la voûte végétale,
— les rayonnements transmis ou réfléchis par les feuilles après interception.

Les photographies hémisphériques, qui donnent les fractions de ciel vues à travers le couvert végétal (s_l) pour différentes hauteurs de visée l, permettent le calcul de ces trois composantes.

3. 2.1. *Rayonnement solaire direct : S.*

L'éclairement énergétique fourni par le rayonnement solaire direct sur un plan horizontal est (I sin h) au-dessus de la culture. Dans la culture, cet éclairement est (I sin h) $\times$ (fraction de surface horizontale occupée par les taches de soleil). La mesure de la surface relative des taches de soleil peut être effectuée par plusieurs techniques (BONHOMME, 1970) dont, en particulier, celle des photographies hémishpériques. En effet, si, pour la hauteur de visée l, la fraction de ciel vue est s_l, cela implique que lorsque le soleil est à la hauteur $h = l$, la surface relative des taches de soleil est s_l (si H_1 est vérifiée).

L'énergie fournie par les taches de soleil, et mesurée sur un plan horizontal, a pour valeur :

$$S = s_h \, (I \sin h)$$

3. 2.2. *Rayonnement diffusé par le ciel :* Dc.

En faisant des sommations successives de l'énergie fournie par chaque couronne sphérique, nous pouvons calculer Dc/D connaissant les valeurs D_l/D selon le type de luminance de ciel envisagé :

$$Dc/D = \sum_{l=5°}^{l=85°} s_l \, (D_l/D) \qquad \text{par} \qquad \Delta l = 10°$$

3. 2.3. *Rayonnement intercepté et rediffusé par les feuilles : Df.*

Pour procéder au calcul nous partageons le couvert végétal en couches successives, chacune étant caractérisée par son indice foliaire et son niveau (fig. 7).

1° *Tranche* Δf_1.

Énergie solaire incidente directe S.
Énergie solaire incidente diffuse D.
Rayonnement direct transmis $S_1 = S\, s_{h1}$.
Rayonnement diffus transmis $Dc_1 = \Sigma s_{l1}\, D_l$.
Rayonnement intercepté et rediffusé si H_5 est vérifiée (tabl. 1) :

$$Df_1 = \{ (S + D) - (S_1 + Dc_1) \}\, T$$

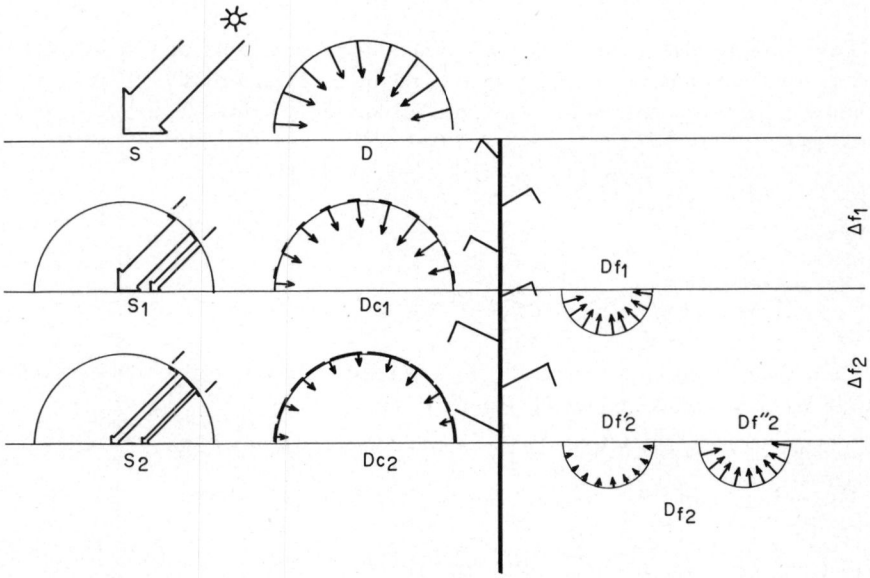


FIG. 7. — *Schéma du calcul de la pénétration de l'énergie solaire dans une culture*

On admet l'hypothèse simplicatrice H_5, peu différente de la réalité ; on néglige également les réflexions et transmissions multiples, ce qui se justifie dans le cas du visible pour lequel T est faible.

2° *Tranche* Δf_2.

Rayonnement direct transmis $S_2 = S\, sh_2$.
Rayonnement direct transmis $Dc_2 = \Sigma\, s_{l2}\, D_l$.

Les rayonnements diffusés par les feuilles et transmis à travers la couche Δf_2 se composent :

— du rayonnement Df_1 diffusé dans la couche précédente et transmis à travers les trous de la couche Δf_2, soit Df'_2 ;

— du rayonnement capté et rediffusé par les feuilles dans cette couche, soit Df''_2.

Le rayonnement Df'_2 transmis par une couronne circulaire de hauteur l est égal à :

$$Df'_2 = Df_{l1}\, s_{l12}$$

où s_{l12} est la surface relative de trous de la deuxième couche seule pour la hauteur l. Si l'on admet H_3 (tabl. 1), on peut écrire :

$$s_{l2} = s_{l12}\, s_{l1}$$

où s_{l1} est la surface relative de trous pour la hauteur l vue du bas de la couche 1,
s_{l2} est la surface relative de trous pour la hauteur l vue du bas de la couche 2 (à travers les deux couches).

Donc :

$$Df'_{l2} = Df_{l1}\,(s_{l2}/s_{l1})$$

Pour intégrer Df'_{l2} sur l'ensemble des valeurs de l nous devons admettre H_6 (tabl. 1), qui nous permet d'appliquer les valeurs de Dl/D tabulées dans le cas d'un rayonnement diffus à luminance constante sur la voûte du ciel (UOC). Nous pouvons alors écrire :

$$Df'_{l2}/Df_1 = (Df_{l1}/Df_1) \cdot (s_{l2}/s_{l1})$$

$$Df'_2/Df_1 = \sum_{l=5}^{l=85} (Df_{l1}/Df_1) \cdot (s_{l2}/s_{l1})$$

$$Df'_2 = Df_1 \sum_{l} (D_l/D)_{UOC} \cdot (s_{l2}/s_{l1})$$

Le rayonnement capté par les feuilles et rediffusé dans cette couche est, compte tenu de H_5 et par analogie avec le calcul de Df_1 :

$$Df''_2 = \{ (S_1 + Dc_1 + Df_1) - (S_2 + Dc_2 + Df'_2) \}\, T$$

On obtient ainsi les rayonnements interceptés et rediffusés sous la couche Δf_2 :

$$Df_2 = Df'_2 + Df''_2$$

Le calcul se continue ainsi de proche en proche jusqu'au bas du couvert végétal en négligeant les réflexions multiples entre les différentes couches.

MacPherson et Torssell (1970) avaient entrepris un calcul analogue mais qui ne s'appuyait pas sur les données fournies par les photos.

3. 3. — *Erreurs sur l'estimation du microclimat lumineux*

Deux types d'erreurs peuvent intervenir dans les estimations de microclimat lumineux basées sur les photographies hémisphériques :

— les erreurs dues aux hypothèses,
— les erreurs dues aux mesures :
des rayonnements au-dessus de la culture,
des parts de ciel vues s_l.

3. 3.1. *Erreurs dues aux hypothèses.*

Sans qu'il soit possible de faire une discussion quantitative de celles-ci, nous pouvons opposer à nos calculs les limitations suivantes :

— le fait de négliger les réflexions multiples entraîne des erreurs importantes si le coefficient de transmission T est élevé (proche infra-rouge) ;

— les facteurs de réflexion et de transmission d'une feuille ne sont pas toujours identiques (H_5) : l'écart est particulièrement marqué pour des feuilles épaisses ou pileuses (SINCLAIR et THOMAS, 1970) ;

— lorsqu'un rayon lumineux est intercepté par une feuille, la lumière réfléchie ou transmise ne l'est pas de façon parfaitement isotrope dans toutes les directions (H_6) ; l'importance des indicatrices de réflexion ou de transmission a été discutée par de nombreux auteurs (et, en particulier, MOLDAU, 1965), en fonction de la nature de la feuille et de l'angle d'incidence ;

— pour certains couverts végétaux peu homogènes (cultures en rang), des zones de ciel sont visibles de façon préférentielle d'un point à l'intérieur de la culture : cela conduit à des erreurs sur l'estimation du rayonnement solaire direct (s_l n'est pas constant pour un l donné en fonction de l'azimut) et du rayonnement diffusé par le ciel qui n'a pas une répartition homogène en fonction de l'azimut ;

— les formules donnant D_l/D par ciel clair ou ciel couvert donnent en fait des valeurs approchées.

3. 3.2. *Erreurs dues aux mesures.*

3. 3.2.1. *Mesure des rayonnements au-dessus de la culture.*

Le pyranomètre utilisé pour mesurer G donne une valeur entachée d'une erreur de l'ordre de 5 p. 100. L'utilisation d'un pare-soleil pour ombrer le pyranomètre de mesure de D entraîne une imprécision supplémentaire (la zone circumsolaire qui a une luminance forte est cachée de façon variable).

3. 3.2.2. *Mesure de s_l.*

Toute erreur de mesure sur s_l influe sur les résultats des calculs de pénétration de l'énergie :

— dans la culture, l'énergie solaire directe étant $S = (I \sin h)\, s_l$, on a :

$$\Delta S/S = \Delta s_l/s_l + \Delta\,(I \sin h)/I \sin h$$

le deuxième terme étant souvent négligeable devant le premier,

— pour l'énergie diffusé par le ciel, le calcul des erreurs est plus complexe car il faut tenir compte :

- de la loi de répartition des luminances choisie,
- des valeurs de s_l aux différentes hauteurs de visée,
- du rapport D/G.

Il apparaît à l'énumération des différentes causes d'erreurs possibles qu'il est difficile d'évaluer avec précision l'influence de chacune d'elles. Le seul moyen de vérification de notre méthode de calcul est donc la comparaison avec des résultats expérimentaux.

3. 4. — *Résultats*

3. 4.1. *Comparaison des calculs et des mesures.*

Pour les différents calculs, il est nécessaire de connaître les valeurs de s_l pour l variant de 5° à 85° mais aussi le climat lumineux au-dessus de la culture (G et D) ainsi que le coefficient de transmission moyen des feuilles T.

Les résultats des mesures de taches de soleil aux différents niveaux ainsi que de la pénétration des rayonnements d'origine solaire dans une culture de Maïs sont présentés par ailleurs (BONHOMME *et al.*, 1971). Le nombre de clichés à chaque niveau était de 16 et l'indice foliaire était mesuré directement.

Cas d'un ciel couvert.

Dans ce cas, le climat lumineux au-dessus de la culture est défini seulement par le rayonnement solaire global incident G (en effet G = D, il n'y a pas de rayonnement solaire direct). Quelle que soit l'heure considérée les lois de répartition des luminances sur la voûte du ciel ne varient pas. Nous avons choisi de représenter sur la figure 8 A, les résultats des calculs obtenus pour un ciel de type SOC et pour un coefficient de transmission des feuilles T égal à 0,20.

Les mesures effectuées à l'aide d'un profil de pyranomètres linéaires ne permettent pas de mettre en évidence des variations significatives dans la forme des profils au cours de la journée ; ceci a été vérifié pour différents jours à ciel ouvert.

L'accord entre les calculs et les mesures peut donc être considéré comme bon.

Cas d'un ciel clair.

Pour définir le climat lumineux au-dessus d'une culture en un lieu donné, il est nécessaire de connaître à l'instant considéré :

— le rayonnement solaire global G,
— le rayonnement solaire diffusé par le ciel D,
— l'heure en Temps Solaire Vrai et la date, de façon à calculer la hauteur du soleil.

Sur la figure 8 B, nous avons porté les résultats des calculs relatifs à la pénétration des rayonnements diffus pour les conditions suivantes :

— hauteur du soleil $h = 0°$, Diffus du ciel seul ; T = 0,20 (courbe 1),
— $h = 20°$, D/G = 0,5 ; T = 0,20 (courbe 2),
— $h = 40°$, D/G = 0,2 ; T = 0,20 (courbe 3).

Nous constatons que les allures des profils sont très différentes selon que la hauteur du soleil est faible (0°-20°) ou forte (40°).

Les profils des seuls rayonnements diffus réalisés à l'aide de pyranomètres linéaires et de bandes pare-soleil mettent en évidence deux allures de courbe selon que la hauteur du soleil est faible ($h < 24°$) ou forte ($h > 24°$).

Les résultats des calculs et des mesures sont donc, là aussi, comparables mais il faut toutefois signaler que l'accord entre les points calculés et expérimentaux est moins bon que par ciel couvert.

Ayant ainsi évalué le profil de rayonnement diffus, nous pouvons calculer l'atténuation du rayonnement global en ajoutant à chaque niveau l'énergie apportée par le rayonnement solaire direct : (I sin h) s_l. Quelques comparaisons entre calculs et mesures ont été effectuées dans la même culture de Maïs. La difficulté provient ici de la mesure du rayonnement global moyen à un niveau : l'hétérogénéité causée par les taches de soleil oblige à faire une intégration des données des pyranomètres à chaque niveau en les déplaçant.

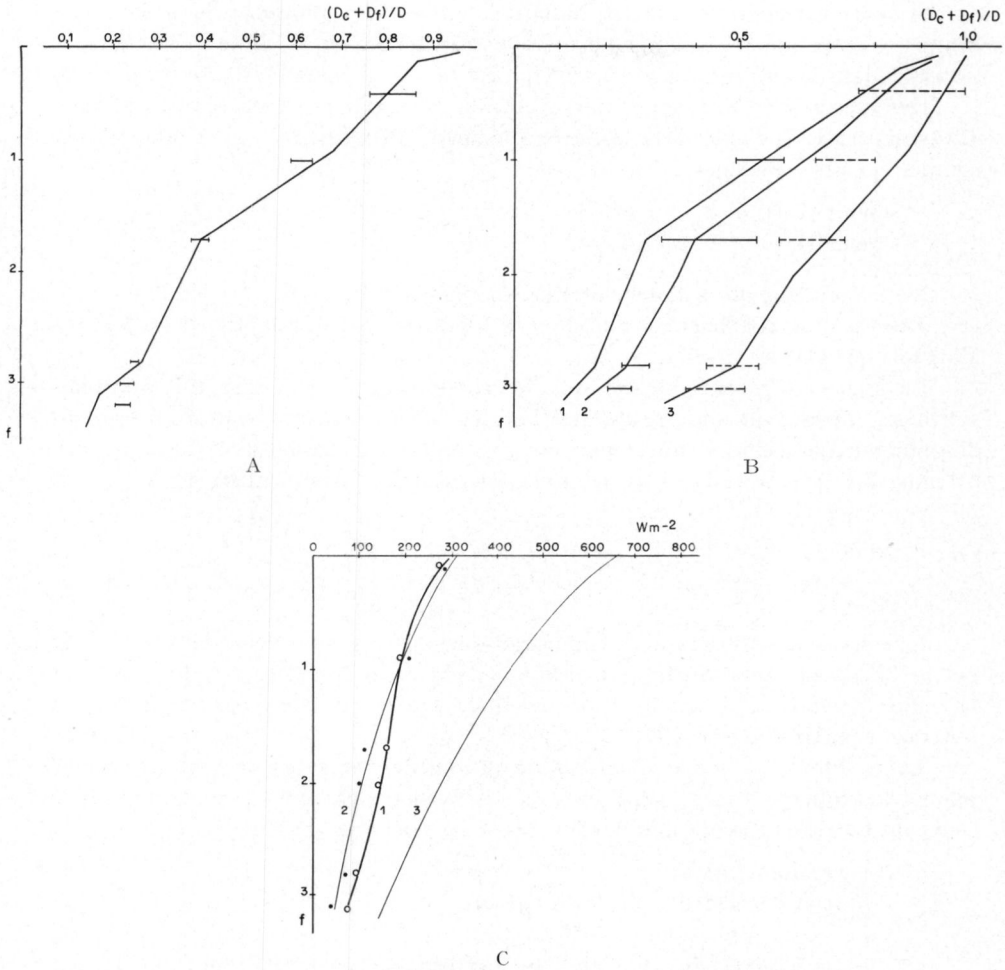


FIG. 8. — *Comparaison des profils de rayonnements descendants calculés et mesurés dans une culture de Maïs en fonction de l'indice foliaire f*

A : Ciel couvert, profil des rayonnements diffus

1 : Calcul à partir des photographies hémisphériques ; T = 0,20

|———| Mesures, intervalle de confiance à 95 p. 100

B : Ciel clair, profil des rayonnements diffus

1 : Calcul ; hauteur du soleil $h = 0°$; D/G = 1,0 ; T = 0,20

2 : Calcul ; $h = 20°$; D/G = 0,50, T = 0,20

|———| mesures pour $h < 24°$, intervalles de confiance à 95 p. 100

3 : Calcul ; $h = 40°$; D/G = 0,20 ; T = 0,20

|------| Mesures pour $h > 24°$, intervalle de confiance à 95 p. 100

C : Ciel clair, $h = 46°$

1 : Calculs des rayonnements utiles à la photosynthèse

2 : Mesures des rayonnements utiles à la photosynthèse

3 : Rayonnement énergétique global.

3. 4.2. *Extension possible des résultats au calcul de l'énergie utile à la photosynthèse.*

Si nous considérons que les radiations utiles à la photosynthèse sont celles comprises entre 400 et 700 nm, nous pouvons affecter à chaque forme de rayonnement transmis dans la culture, un coefficient qui est la part d'énergie utile qu'il contient.

Des mesures de la composition spectrale des rayonnements solaires global et diffus effectuées à l'aide d'un spectroradiomètre (BONHOMME, 1971) nous donnent comme valeurs moyennes :

pour (I sin h) $\beta = 0{,}50$;
pour Dc $\beta = 0{,}60$.

Les rayonnements solaires interceptés puis rediffusés par les feuilles peuvent être affectés d'un coefficient voisin de 0,10 (d'après des résultats expérimentaux sur Maïs tels que GAUSMAN *et al.*, 1970).

La figure 8 C montre un exemple de calcul du profil d'énergie utile à la photosynthèse, effectué sur une culture de Maïs ; les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles évaluées par une autre méthode, basée sur les mesures faites à l'aide d'un spectroradiomètre (VARLET-GRANCHER et BONHOMME, 1971).

CONCLUSION

Une série de photographies hémisphériques prise à un niveau dans une culture permet d'obtenir, pour différentes hauteurs de visée, la fraction de ciel vue à travers la voûte végétale s_l. Deux types de résultats intéressant l'écologiste peuvent être obtenus à partir de ces clichés.

La mesure de l'indice foliaire f de la couche végétale surmontant l'appareil photographique peut être réalisée avec une précision suffisante. Cette technique présente de nombreux avantages sur les méthodes classiques :

— grande rapidité,
— pas de destruction de la culture,
— bonne précision,
— possibilité de stockage de l'information (clichés) pour d'éventuelles vérifications.

Il est toutefois nécessaire de faire au préalable, pour une culture donnée, une comparaison avec une mesure classique afin de s'assurer de la validité de la méthode.

L'estimation du microclimat lumineux à l'emplacement de l'appareil photographique peut être effectuée à un instant donné si l'on connaît le rayonnement global G et le rayonnement diffusé par le ciel D au-dessus de la culture ainsi que le facteur de transmission des feuilles T.

Cette méthode permet, à l'aide des clichés, d'estimer le microclimat aux différentes heures de la journée et pendant toute la période où les obstacles à la pénétration des rayonnements solaires n'évoluent pas : elle évite donc l'emploi de pyranomètres et d'enregistreurs coûteux. Sa rapidité est assez grande et elle peut être utile lorsqu'une grande précision n'est pas nécessaire.

Reçu pour publication en février 1976.

SUMMARY

DETERMINATION OF LEAF AREA INDEX AND PENETRATION OF THE SOLAR RADIATION WITHIN PLANT CANOPIES BY HEMISPHERICAL PHOTOGRAPHS USE

Hemispherical photographs taken at different levels inside the canopy give the gap frequencies for different viewing angles.

These data are used to obtain the leaf area index (LAI) among crops using a method derived from the point quadrat method (WARREN WILSON, 1963 *a*).

These data can also be used to characterize the penetration of the solar radiation into a crop as far as the diffuse and the direct radiations are given.

The experimental results are obtained for crops having very different structures (maize, sugar cane, cow pea and sweet potatoes).

ZUSAMMENFASSUNG

BESTIMMUNG DER BLATTINDEX-UND STRAHLUNGSPROFILE IN EINER PFLANZENDECKE VERMITTELS AN ORT UND STELLE GEMACHTER HALBKUGELFORMIGEN AUFNAHMEN

Halbkugelförmige Aufnahmen, die an einer bestimmten Höhe in der Kultur gemacht werden, gestatten den durch die Pflanzendecke sichtbaren Himmelteil für verschiedene Zielhöhen zu erhalten.

Vorsichtsmassnahmen für die Aufnahmenerhaltung sowie verschiedene Auswertungsmethoden werden gegeben.

Es wurde gezeigt dass für die Zielhöhe von 35° der S_{35} der sehr wenig von der Kulturgeometrie sondern hauptsächlich vom Blattindex f abhängt :

$$f = -2{,}58 \log 10\ S_{35}$$

Anderseits wenn die Globalstrahlung und die diffuse Strahlung über der Kultur gekannt sind, kann das Lichtmikroklima an der der Aufnahme entsprechenden Stelle geschätzt werden.

Die verschiedenen Fehlerquellen werden im jeden Fall erläutert. Die Vergleichung der Rechnungen und direkten Messungen ist befreidigend für die verschiedenen geprüften Kulturen : Mais, Zuckerrohr, Rebe, Süsskartoffel.

РЕЗЮМЕ

Определение профилей листового показателя и излучения в растительном покрове с помощью полу-сферических фотографий снятых *in situ*.

Р. БОНОММ.

Полу-сферические фотографии, снятые на определенных уровнях в культурах, позволяют получить фракцию неба видимую через растительный свод S_l для различных высот наводки l.

Указываются предосторожности, принятие которых необходимо при такого рода снимках, и разные методы анализа этих последних.

Доказывается, что для угла наводки в 35° величина S_{35} мало зависит от геометрии культуры, но является функцией листового показателя :

$$f = -2{,}58 \log_{10} S_{35}$$

С другой стороны, когда известны общее и рассеянное излучения над культурой, становится возможной и оценка светового микроклимата местонахождения соответствующего снимку.

В каждом случае проводится обсуждение причин возможных ошибок. Сравнение между результатами рассчетов и прямых измерений — удовлетворительно для всех испытывавшихся культур : кукуруза, сахарный тростник, вигна, батат.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON M. C., 1964. Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light conditions. *J. Ecol.*, **52**, 27-41.

ANDERSON M. C., 1966. Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. *J. appl. Ecol.*, **3**, 41-54.

BECKER M., 1971. Une technique nouvelle d'utilisation des photographies hémisphériques pour la mesure du climat lumineux en forêt. *Ann. Sci. forest.*, **28** (4), 425-442.

BONHOMME R., 1970. Surface relative des taches de soleil dans la végétation. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, I.N.R.A., Paris, 99-104.

BONHOMME R., 1971. Composition spectrale des rayonnements solaire et céleste et énergie disponible pour les végétaux. *Cahiers de l'A.F.B.*, III, **3**, 23-31.

BONHOMME R., CHARTIER P., 1972. The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sun lit foliage area and gap frequency. *Israel J. agric. Res.*, **22** (2), 53-61.

BONHOMME R., CHARTIER P., VARLET-GRANCHER C., 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de Maïs. II. Éclairement d'un plan horizontal au-dessus et aux différents niveaux de la culture. *Ann. agron.*, **22** (4), 383-396.

BONHOMME R., VARLET-GRANCHER C., CHARTIER P., 1974. The use of hemispherical photographs for determining the leaf area index of young crops. *Photosynthetica.*, **8** (3), 299-301.

BROWN H. E., 1962. The canopy camera. *Rocky Mtn. Forest. Range Exp. Sta.*, Station paper n° 72, 1-22.

CHARTIER P., 1966. Étude du microclimat lumineux dans la végétation. *Ann. agron.*, **17** (5), 571-602.

C.N.B.E., 1964. *L'éclairage naturel et ses applications.* Comm. 430, Édit. S.I.C., Bruxelles.

COWAN I. R., 1968. The interception and absorption of radiation in plant stands. *J. Appl. Ecol.*, **5**, 367-379.

des DIGUERES P., 1971. *Le couvert en zone de culture, facteur abiotique pouvant influencer le maintien de la perdrix grise Perdrix perdix. Étude critique des travaux antérieurs et techniques de mesure.* Mémoire option Écologie, Faculté des Sciences, Orléans.

DOGNIAUX R., 1973. *Exposition énergétique par ciel serein des parois orientées et inclinées. Données d'application pour la Belgique.* Inst. Météo., Belgique, éd. M.I.S.C., série B, 25 et 26, 153, 86 p.

DOURGNON J., GODFERT A., 1965. Représentation algébrique de la répartition des luminances du ciel. *Cahiers du C.S.T.B.*, n° 77, cahier 658.

DUCREY M., 1975. Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire. I. Analyse théorique de l'interception. *Ann. Sci. forest.*, **32** (2), 73-92.

EVANS G. C., COOMBE D. E., 1959. Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *J. Ecol.*, **47**, 103-113.

GAUSMAN H. W., ALLEN W. A., SCHUPP M., WIEGAND C. L., ESCOBAR D. E., RODRIGUEZ R. R., 1970. *Reflectance, transmittance and absorbance of light of leaves for 11 plant genera with different leaf mesophyll arrangements.* Texas A.M. University, technical monograph n° 7, 50 p.

HILL R., 1924. A lens for whole sky photographs. *Quart. J. Roy. meteorol. Soc.*, **50**, 227-235.

ISOBE S., 1969. Theory of the light distribution and photosynthesis in canopies of randomly dispersed foliage area. *Bull. Nat. Inst. agr. Sci.* (Tokyo), A 16, 1-25.

KITTLER R., 1967. Standardization of outdoor conditions for the calculation of daylight factor with clear skies. *Proceedings C.T.E. Bouwcentrum International.*, Rotterdam.

KVET J., MARSHALL J. K., 1971. Assesment of leaf area and other assimilating plant surfaces. In : *Plant Photosynthetic Production* ; *Manual of Methods*, W. JUNK, The Hague, 517-555.

LEMEUR R., 1970. Effects of spatial leaf distribution on penetration and interception of direct radiation. *Symposium on plant response to climatic factors*, U.N.E.S.C.O., Uppsala, 349-356.

MACPHERSON H. G., TORSSELL B. W. R., 1970. *A computer program for the numerical solution of a model of the penetration, propagation, and absorption of radiation within plant canopies.* Technical memorandum 70/8. C.S.I.R.O., Division of Land Research, Canberra, 31 p.

MARSHALL J. K., 1968. Methods for leaf area measurement of large and small leaf samples. *Photosynthetica*, **2** (1), 41-47.

MOLDAU K., 1965. Emploi de la lumière polarisée pour l'analyse du facteur de réflexion des feuilles (en russe). In : *Voprosy Radiatsionnogo Rezhima. Rastitel'nogo Pokrova.* Izd. Akad. Nauk., Eston. S.S.R., Tartu, 96-101.

MONSI M., SAEKI T., 1953. Über den lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedentung für die Stoffproduction. *Jap. J. Bot.*, **14**, 22-52.

MOON P., SPENCER D. E., 1942. Illumination from a non-uniform sky. *Trans. Illum. Eng. Soc.*, **37**, 707-712.

de PARCEVAUX S., CATSKY J., 1970. Méthodes et techniques de mesure des surfaces foliaires. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, I.N.R.A., Paris, 493-499.

REEVE J. E., 1960. Annexe de l'article de WARREN WILSON J., *New Phytol.*, **59**, 1-8.

ROSS J. K., 1968. The present state of investigation in the radiation regime of the plant cover en russe. Actinometry and atmospheric Optics, *Rep. 6th Intern. Departm. Symp. on actinometry and atmospheric optics*, Tartu, 255-260.

SINCLAIR R., THOMAS D. A., 1970. Optical properties of leaves of some species in Arid South Australia. *Must. J. Bot.*, **18**, 261-273.

SUSUKI T., SATOO T., 1954. An attempt to measure the daylight factor under the crown canopy using a solid angle projecting camera. *Bull. Tokyo Univ. Forest.*, **40**, 160-180.

VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de Maïs. III. Composition spectrale de la lumière dans la culture. *Ann. agron.*, **22** (5), 515-525.

WALSH J. W. T., 1961. *The Science of Daylight.* MacDonald, London.

WARREN WILSON J., 1959. Analysis of the spatial distribution of foliage by two dimensional point quadrats. *New Phytol.*, **58**, 92-101.

WARREN WILSON J., 1960. Inclined point quadrat. *New Phytol.*, **59**, 1-8.

WARREN WILSON J., 1963 *a*. Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined points quadrats. *Austr. J. Bot.*, **11**, 95-105.

WARREN WILSON J., 1963 *b*. Errors resulting from thickness of point quadrats. *Austr. J. Bot.*, **11**, 178-188.

de WIT C. T., 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Agr. Res. Rep.* (Wageningen), **663**, 1-57.

Ann. agron., 1976, **27** (1), 61-84.

ÉTUDE GLOBALE DE LA CULTURE DE LA BETTERAVE A SUCRE SUR LE PÉRIMÈTRE DU HAUT CHÉLIFF

II. — Analyses en régression

A. P. CONÉSA [1], P. CAZES, R. TOMASSONNE [2], P. BAILLON, D. HADJ-MILOUD, C. MAGINIEAU et G. LEMAIRE
avec la collaboration des étudiants de l'I. N. A. (El-Harrach) promotion 1969-1973

Laboratoire d'Agriculture, Institut national agronomique d'Algérie, El-Harrach (Algérie)

RÉSUMÉ

L'analyse des correspondances a permis une première approche globale du système peuplement de betterave-milieu-techniques, mais ne permet pas d'apprécier si les liaisons mises à jour sont significatives. Les méthodes d'analyse en régression sous contrainte positive ou pas à pas ont permis de préciser les résultats de l'analyse des correspondances, en montrant en particulier les liaisons qui existent entre les rendements en sucre et les variables quantitatives qui caractérisent la compétition intraspécifique (densité, indice de dispersion), la durée du cycle végétatif, l'irrigation et la salinisation. Les études en régression et l'analyse factorielle fournissent des résultats concordants et apparaissent complémentaires.

La production de betteraves sucrières sur le périmètre de mise en valeur du Haut Chéliff pourrait être améliorée de façon sensible par l'application de techniques agronomiques connues. Cependant, pour être cohérente, toute intervention doit, à notre avis, partir d'une analyse de la situation sur le terrain.

Un premier traitement statistique par la méthode d'analyse factorielle des correspondances nous a permis d'examiner l'ensemble des facteurs (milieu, techniques) qui conditionnent la production de la betterave. Cette méthode d'analyse est synthé-

(1) I. N. R. A., Département d'Agronomie, détaché au Laboratoire d'Agriculture de l'I. N. A. d'Algérie (El-Harrach). Adresse actuelle : Station d'Agronomie, 68021 Colmar.
(2) I. N. R. A., Laboratoire de Biométrie, Centre national de Recherches zootechniques, 78350 Jouy en Josas.

tique mais elle laisse entier le problème de la sécurité statistique des liaisons qu'elle suggère, ce qui nous a conduits à approfondir ces premiers résultats de l'analyse factorielle par plusieurs analyses en régression des variables quantitatives.

I. — MÉTHODOLOGIE

1. 1. — *Les variables étudiées*

Pour tenter « d'expliquer » les rendements en sucre par station, nous avons retenu les variables suivantes :

1 : pourcentage de betteraves fourchues,
2 : pourcentage de betteraves non marchandes (de diamètre < 45 mm),
3 : densité de betteraves au mètre carré,
4 : $\frac{\sigma^2}{\bar{x}}$ indice de dispersion,
5 : durée de végétation en jours,
6 : nombre de jours du semis au démariage,
7 : déficit de pression aux asperseurs

$$\left(\frac{\text{P. théorique} - \text{P. réelle} \times 100)}{\text{P. théorique}}\right)$$

8 : humidité équivalente du sol (en p. 100),
9 : quantité d'eau (apport par l'irrigation),
10 : azote total du sol (en p. 1 000),
11 : phosphore du sol (en p.p.m.),
12 : pourcentage de saturation en Na du complexe du sol (en meq pour 100 g de sol),
13 : azote dans les feuilles (en p. 100 de MS),
14 : phosphore dans les feuilles (en p. 100 de MS),
15 : potassium dans les feuilles (en p. 100 de MS),
16 : sodium dans les feuilles (en p. 100 de MS),
17 : magnésium dans les feuilles (en p. 100 de MS),
18 : calcium dans les feuilles (en p. 100 de MS),
19 : rapport argile sur limon du sol,
20 : indice de stabilité structurale (test HÉNIN *et al.*, 1969),
21 : perméabilité (test HÉNIN *et al.*, 1969),
22 : agrégats stables au benzène (p. 100, test HÉNIN *et al.*, 1969),
23 : teneur en bore des feuilles (en p.p.m.).

Les variables plante, que nous avons soulignées sur la liste ci-dessus, prennent en compte une partie de l'action du milieu. Ce qui nous a conduits à effectuer plusieurs traitements : le premier relatif aux variables du milieu, le second aux variables plante, le troisième à l'ensemble des variables. Certaines variables (densité, durée de végétation) que nous avons considérées comme des variables milieu auraient pu être classées parmi les « variables plante ».

1. 2. — *Les analyses en régression*

1. 2.1. *La régression multiple.*

Pour étudier les variables, nous avons utilisé, outre l'analyse des corrélations, la régression multiple usuelle, la régression progressive et la régression sous contrainte.

Rappelons que dans ces méthodes de régression, on cherche à expliquer une variable y, ici le rendement, en fonction d'un certain nombre de variables x_1, x_2, x_p, à l'aide d'une formule de la forme :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_px_p = y^* + e \qquad (1)$$

où $y^* = a_0 + \Sigma\, a_ix_i$, est la valeur approchée (ou reconstituée) de y et e le résidu, c'est-à-dire la partie de y non expliquée par les x_i.

Dans la régression multiple usuelle, les coefficients $a_0, a_i, \cdots, a_p$ qui sont calculés à partir d'un échantillon de n observations des variables précédentes, sont déterminés de telle sorte qu'ils minimisent la variance du résidu e ; à chaque a_i ($0 \leqslant i \leqslant p$) ainsi calculé, on peut associer un écart-type σ_i. Le rapport $t_i = \frac{a_i}{\sigma_i}$ (qui suit un t de student à ($n - p - 1$) degrés de libertés, sous des hypothèses de normalité) permet de tester la signification de a_i. Le carré du coefficient de corrélation multiple qui est, rappelons-le, le rapport de la variance de la partie y^* expliquée par les x_i à la variance de y, permet de se rendre compte de la qualité de l'ajustement.

On sait que lorsque le nombre de variables explicatives augmente et devient grand, ou si ces variables sont très corrélées, la régression usuelle devient mauvaise, la reconstitution de y à l'aide de la formule (1) pouvant devenir illusoire :

— soit par suite du trop grand nombre de variables explicatives ; à la limite, si le nombre de variables explicatives (nombre égal à $p + 1$), est égal au nombre n d'observations, on arrivera à reconstituer exactement chacune des n valeurs y_j de y (c'est-à-dire, le résidu $e_j = y_j - y_j^*$ est nul pour $j = 1,2 \cdots n$), et ceci indépendamment des liaisons existant entre y et les i. En effet, en écrivant l'équation (1) (où l'on fait $e = 0$) pour chaque observation j ($1 \leqslant j \leqslant n$), on aura un système de n équations à n inconnues $a_0, a_i \cdots a_n - 1$ qui, sauf cas particulier de dégénérescence, a une solution unique pour laquelle il est identiquement vérifié, c'est-à-dire pour laquelle la valeur y_j^* de $a_0 + \Sigma\, a_ix_i$ pour la $j^{\text{ième}}$ observation ($1 \leqslant y \leqslant n$) est égale à la valeur y_j de y.

— soit par suite de termes a_ix_i élevés en valeur absolue et de signes contraires, donc se retranchant. Ceci se produit quand les x_i sont très corrélés. A la limite, si deux variables explicatives sont parfaitement liées, c'est-à-dire si elles ont un coefficient de corrélation égal à 1 en valeur absolue, par exemple $|x_1| = |x_2|$, la formule 1 devient indéterminée.

Pour pallier, dans ces cas, les défauts de la régression classique, on peut utiliser une méthode de régression progressive ou une méthode de régression sous contrainte.

1. 2.2. *La régression progressive ou régression pas à pas.*

Dans cette méthode (Draper et Smith, 1966), on introduit les variables une par une : la première variable introduite, disons x_1 pour fixer les idées, est celle qui fournit la meilleure explication du rendement y, c'est-à-dire celle qui a le coefficient de corrélation avec y le plus élevé en valeur absolue. La seconde variable introduite x_2 est celle qui, avec la première variable sélectionnée, x_1, donne le coefficient de corrélation multiple avec y le plus élevé. Pour l'obtenir, on calcule donc l'équation de régression (qui comporte deux termes), et le coefficient de corrélation multiple associé, obtenus en prenant chaque variable (autre que x_1) et x_1, et l'on sélectionne la variable qui permet le meilleur ajustement. De même, la troisième variable introduite x_3 est celle qui donne parmi toutes les régressions à 3 variables où figurent x_1 et x_2, le coefficient de corrélation multiple avec y le plus élevé.

Le processus se poursuit jusqu'à ce que toutes les variables soient introduites, auquel cas on retombe sur la régression multiple usuelle. A chaque palier, on teste la signification de la nouvelle variable introduite et celle de toutes les variables apparues avant elle dans l'équation.

Si l'on considère l'ensemble des liaisons entre les x_i, les x_i conservés sont liés aux rendements mais il est possible que des variables soient rejetées parce qu'une partie de leur effet sur le rendement est pris en compte par une ou plusieurs autres variables retenues (Decourt *et al.*, 1969 ; Deffontaines et Gras, 1968).

Quoique ne figurant pas dans l'équation de régression obtenue, ces variables pourront donc intervenir indirectement sur les rendements. Dans ce cas, l'examen des corrélations entre les x_i nous permettra de nuancer nos conclusions. Cette méthode de régression est particulièrement bien adaptée quand on a un grand nombre de variables explicatives.

1. 2.3. *La régression sous contrainte.*

Dans cette méthode, on impose aux coefficients de régression a_i de la formule (1) d'être positifs, c'est-à-dire qu'on essaye de reconstituer le rendement de y à l'aide d'une somme de termes a_ix_i positifs, les variables intervenant dans l'étude du rendement étant des variables essentiellement positives ; on ne prend donc en compte que les variables influençant positivement le rendement.

Comme dans la régression classique, on définit la quantité R^2 qui est l'analogue du carré du coefficient de corrélation multiple et qui n'est autre que le pourcentage de la variation totale

de y que l'équation de régression permet d'expliquer ; l'on définit de même le résidu $S^2 = 1 - R^2$ qui n'est autre que le pourcentage de la variation totale de y non expliquée, et c'est cette quantité que l'on minimise moyennant les contraintes de positivité des a_i (en régression usuelle on minimise cette quantité sans imposer de contrainte $a_i > 0$).

Le fait de reconstituer y à partir de contributions positives *évite une reconstitution illusoire à l'aide de termes élevés et de sens contraires*, ces termes étant dus, comme on l'a noté plus haut, à des variables très corrélées ; on diminue donc l'effet de liaisons entre les variables explicatives, mais il peut subsister un effet de masque (cet effet étant moins important que dans la régression progressive), une variable liée positivement au rendement pouvant ne pas intervenir (ou peu intervenir) du fait de sa liaison avec une variable contribuant elle aussi positivement au rendement.

La régression sous contrainte est équivalente à une régression multiple particulière : la régression est faite sur les variables qui ont un coefficient de régression sous contrainte non nul, c'est-à-dire, strictement positif. On pourra donc, comme dans la régression usuelle ou la régression progressive, tester la signification de ces variables.

Le principal inconvénient de cette méthode, qui s'applique donc à des données positives et qui protège bien la régression contre une reconstitution illusoire du rendement y, se trouve dans son principe même : elle ne fait intervenir que les variables liées positivement au rendement et non les variables qui lui sont liées négativement.

Pour pallier cet inconvénient, il suffit de faire la régression sous contrainte positive non plus sur les variables x_i, mai sur les variables $z_i = \max x_i - x_i$ où $\max x_i$ désigne la valeur maximale (pour l'échantillon considéré) de la variable x_i.

Nous désignerons par N cette régression sous contrainte positive sur les variables z_i (influence négative des x_i) et par P la régression sous contrainte positive sur les variables x_i (influence positive des x_i).

2. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

La présentation des résultats qui concernent un grand nombre de variables n'est pas chose aisée. Dans un premier temps, nous donnerons un aperçu global des résultats obtenus à l'aide des différentes méthodes ; dans un deuxième temps, nous examinerons en détail les variables qui présentent une relation avec les rendements en betteraves.

Les variables plante (p. 100 de betteraves non marchandes par exemple) pouvant masquer l'effet des variables du milieu sur les rendements, nous avons effectué un traitement séparé de ces deux types de variables, avant de faire un traitement global.

2. 1. — *Analyse en régression progressive*

2. 1.1. *Variables milieu.*

Les variables milieu les plus liées au rendement sont :

x_5 = durée de végétation,
x_4 = $\sigma^2/\bar{x}$ (dispersion),
x_{21} = perméabilité,

qui sont respectivement introduites dans cet ordre par la régression progressive. Au palier 4, c'est la variable quantité d'eau qui est introduite, mais elle n'est pas significative au seuil 5 p. 100.

L'équation de la régression au palier 3 s'écrit :

$$y^* = 0{,}29\ x_5 - 0{,}28\ x_4 + 0{,}19\ x_{21} + 0{,}93.$$

Le coefficient de corrélation multiple associé est de 0,41.

2. 1.2. *Variables plante.*

Deux variables ont une influence essentielle sur le rendement :

x_2 = p. 100 de betteraves non marchandes,
x_{23} = bore dans les feuilles,

qui sont respectivement introduites dans cet ordre.

La troisième variable introduite est le potassium dans la plante qui n'est pas significatif au seuil 5 p. 100. L'équation de régression au palier 2 s'écrit :

$$y^* = -0{,}59\ x_2 + 0{,}17\ x_{23} + 2{,}82.$$

Le coefficient de corrélation multiple vaut 0,615.

2. 1.3. *Ensemble de variables.*

Cinq variables (1) semblent jouer un rôle prépondérant sur la fluctuation du rendement :

x_2 = pourcentage de betteraves non marchandes,
x_3 = densité de betteraves au m²,
x_9 = quantité d'eau apportée dans le sol,
x_{12} = p. 100 de saturation en Na du sol,
x_{23} = teneurs en bore dans les feuilles.

Les résultats de cette analyse sont résumés sur le tableau 11.

TABLEAU 11

Résultats de la régression progressive au 5e palier
(ensemble des variables)

x_i	Variables (1)	Coeff. de régression	Écart-type	t de Student 87 ddl
2	Betteraves non marchandes (%)	— 0,60	0,075	— 8,0
3	Densité	0,256	0,075	3,41
9	Quantité d'eau	— 0,212	0,076	— 2,79
12	Na en p. 100 de saturation	— 0,179	0,075	— 2,37
23	Bore feuille	0,273	0,077	3,54

Coefficient de corrélation multiple R = 0,724.
Constante a_0 = 1,91.
(1) Variables réduites.
** Seuil de signification à 5 p. 100 = 2.

(1) Ces analyses n'ont porté que sur 93 stations et non 95 du fait de données manquantes pour 2 stations.

L'ordre d'introduction des variables dans la régression pas à pas est le suivant:

$$x_2,\ x_3,\ x_{23},\ x_9,\ x_{12},$$

tandis que l'importance de ces variables dans la régression, importance traduite par la valeur du t de Student, associée à chaque coefficient de régression, est par ordre décroissant :

p. 100 de betteraves non marchandes, teneur en bore des feuilles, densité de betteraves au m², quantité d'eau apportée, p. 100 de saturation en Na du sol.

Les variables teneurs en bore et densité de betteraves non marchandes apparaissent comme très importantes. Chacune de ces variables est significative au seuil de 5 p. 100. Le bore et la densité agissent positivement sur le rendement alors que les 3 autres variables retenues ont une action négative.

Le coefficient de corrélation multiple passe de 0,597 pour la première variable introduite (p. 100 de betteraves non marchandes) à 0,724 après la 5e variable introduite (p. 100 de saturation en sodium du sol) et 0,736 après la sixième variable introduite (p. 100 de potassium dans la plante) qui n'est pas significative au seuil de 5 p. 100.

On peut noter que les variables qui interviennent dans la régression progressive parmi les variables du milieu, à savoir indice de dispersion (x_4), durée de végétation (x_5) et perméabilité (x_{21}) n'interviennent plus dans la régression progressive sur l'ensemble des variables. Ceci est essentiellement dû à l'influence prépondérante, dans cette dernière analyse, du pourcentage de betteraves non marchandes (variable x_2) qui n'intervenait pas dans l'analyse des variables du milieu, puisque c'est une variable plante : le pourcentage de betteraves non marchandes qui est lié [1] positivement à $\sigma^2/\bar{x}$ ($r = 0{,}18$) et négativement à la durée de végétation ($r = -0{,}17$) et au test de perméabilité ($r = 0{,}10$), semble prendre en compte une partie de l'influence de ces facteurs sur le rendement et masque leur influence.

On remarque que certaines variables qui traduisent l'influence du travail du sol, par exemple le p. 100 de betteraves fourchues, n'ont pas d'effet apparent sur les rendements. Ces premières conclusions méritent d'être nuancées. Il est possible que l'influence des propriétés physiques du sol soit partiellement prise en compte par la variable p. 100 de betteraves non marchandes. L'examen des coefficients de corrélation montre que le p. 100 de betteraves non marchandes (diamètre < 45 mm) est lié à des facteurs qui expriment la compétition inter et intraspécifique (indice de dispersion, enherbement des stations en juin), mais aussi à la texture du sol (teneur en argile).

De même, le taux de saturation en sodium du sol peut traduire partiellement l'effet de la structure du sol et en particulier la perméabilité. Il existe en effet, une corrélation entre la saturation du complexe absorbant en sodium et la perméabilité. Là aussi, on peut penser que l'action des facteurs édaphiques est partiellement masquée par la variable taux de saturation en sodium.

Pour certaines variables comme le phosphore dans le sol, les valeurs sont en

[1] De façon non significative au seuil de 5 p. 100 (0,20) ou de 1 p. 100 (0,25).

général faibles et pourraient laisser présager une déficience au niveau de la nutrition phosphatée conduisant à une baisse des rendements. La régression pas à pas n'a pas mis en lumière cet effet du phosphore.

TABLEAU 12

Résultats des analyses en régression usuelle et sous contrainte
(variables milieu)

x_i	Variables	A		P		N	
		a_i	t_i	a_i	t_i	a_i	t_i
3	Densité	0,089	0,80	0,16	1,61	0	
4	Indice de dispersion	— 0,28	— 2,55	0		0,24	**2,60**
5	Durée de végétation	0,35	2,21	0,19	**2,90**	0	
6	Nombre de jours semis-démariage	— 0,05	— 0,33	0		0	
7	Déficit de pression aux asperseurs	— 0,089	— 0,78	0		0,035	0,32
8	Humidité équivalente	0,15	1,26	0,05	0,48	0	
9	Quantité d'eau	— 0,15	— 1,50	0		0,18	**1,89**
10	N sol	0,13	1,19	0,05	0,51	0	
11	P sol	0,14	1,38	0,13	**1,29**	0	
12	Na p. 100 de saturation	— 0,12	— 1,13	0		0,11	1,15
19	Argile/limon	— 0,02	— 0,14	0		0	
20	Indice de stabilité	0,084	0,60	0		0,080	0,81
21	Perméabilité	0,213	1,68	0,13	**1,35**	0	
22	Agrégats stables (p. 100) (test benzène)	— 0,051	— 0,43	0		0,07	0,61
	Constante	— 0,37	— 0,26	0		0	
		R = 0,53		R = 0,39		R = 0,36	

a_i : coefficient de régression de la $i$ème variable.
t_i : t de Student associé à a_i (78 ddl).
Seuil de signification à 5 p. 100 = 2 pour A ; 1,67 pour P et N
— — à 10 p. 100 = 1,67 pour A ; 1,30 pour P et N.
A : régression usuelle.
P : régression sous contrainte positive sur les x_i (influence positive sur le rendement).
N : régression sous contrainte positive sur les $z_i = \max x_i - x_i$ (influence négative sur le rendement).

2. 2. — *Analyse en régression multiple usuelle et en régression sous contrainte*

2. 2.1. *Variables milieu.*

Le tableau 12, résume les résultats obtenus pour les variables milieu. On retrouve l'influence négative, quoique faible, de la variable quantité d'eau apportée pendant une irrigation et un accroissement des rendements avec le facteur perméabilité ; au contraire, l'accumulation du sodium dans le sol (variable corrélée négativement avec le test de perméabilité), a un effet dépressif sur les rendements. L'effet de la compétition intraspécifique apparaît à travers la relation positive densité-rendements et la relation négative indice de dispersion-rendements.

Les analyses sous contrainte P (influence positive) et N (influence négative) confirment les résultats de l'analyse en régression usuelle en les affinant :

— influence positive de la densité des betteraves, de la durée de végétation, du phosphore du sol et du test de perméabilité ;

— influence négative sur les rendements en betteraves, de l'indice de dispersion, de la quantité d'eau.

TABLEAU 13

Résultats des analyses en régression usuelle et sous contrainte positive
(variables plante)

x_i	Variables	A		P		N	
		a_i	t_i	a_i	t_i	a_i	t_i
1	Betteraves fourchues (%)	— 0,0002	0,002	0		0	
2	Betteraves non marchandes (%)	— 0,58	— 6,45	0		0,575	7,27
13	N feuilles	0,008	0,066	0		0	
14	P feuilles	— 0,015	— 0,14	0,171	1,69	0	
15	K feuilles	— 0,23	— 1,98	0		0,18	2,92
16	N feuilles	— 0,18	— 1,16	0		0,043	0,38
17	Mg feuilles	— 0,02	— 0,125	0		0,093	0,69
18	Ca feuilles	— 0,006	— 0,048	0		0,0008	0,007
23	Bore feuilles	0,165	1,83	0,216	2,13		
	Constante	4,7	3,56	0,56	0,62	0	
		R = 0,65		R = 0,265		R = 0,62	

Pour la légende : cf. tableau 12.

TABLEAU 14

Résultats de la régression usuelle et sous contrainte positive
(ensemble des variables)

x_i	Variables	A		P		N	
		a_i	t_i	a_i	t_i	a_i	t_i
1	Betteraves fourchues (%)	0,054	0,629	0		0	
2	Betteraves non marchandes (%)	— 0,53	— 6,14	0		0,50	5,82
3	Densité	0,28	3,06	0,14	1,50	0	
4	Indice de dispersion	— 0,12	— 1,27	0		0,04	0,53
5	Durée de végétation	0,32	2,29	0,13	1,57	0	
6	Nombre de jours semis-démariage	— 0,17	— 1,38	0		0	
7	Déficit de pression aux asperseurs	— 0,007	— 0,075	0		0,051	0,58
8	Humidité équivalente	0,10	1	0,041	0,42	0	
9	Quantité d'eau	— 0,20	— 2,2	0		0,06	0,72
10	N du sol	0,046	0,53	0		0	
11	P du sol	0,043	0,51	0,10	0,97	0	
12	Na p. 100 de saturation	— 0,33	— 3,37	0		0,035	0,50
13	N feuilles	— 0,032	— 0,29	0		0	
14	P feuilles	— 0,043	— 0,39	0,067	0,78	0	
15	K feuilles	— 0,24	— 2,14	0		0,095	1,28
16	Na feuilles	— 0,17	— 1,12	0		0	
17	Mg feuilles	0,34	2	0		0,061	0,51
18	Ca feuilles	— 0,33	— 2,35	0		0,008	0,07
19	Argile/Limon	— 0,040	— 0,34	0		0	
20	Indice de stabilité	0,15	1,3	0		0	
21	Perméabilité	0,068	0,67	0,10	1	0	
22	Agrégats stable benzène	— 0,059	— 0,61	0		0	
23	Bore feuilles	0,30	3,17	0,75	0,84	0	
	Constante	2,06	1,10	0		0	
		R = 0,79		R = 0,40		R = 0,65	

Légende : cf. tableau 12.

2. 2.2. *Variables plante.*

Les résultats portés sur le tableau 13 montrent que le p. 100 de betteraves non marchandes et, à un degré moindre, le potassium des feuilles ont un effet négatif sur les rendements ; au contraire les rendements augmentent avec les teneurs en bore des feuilles. L'analyse sous contrainte positive P met en lumière l'effet du phosphore qui était masqué dans l'analyse usuelle.

2. 2.3. *Ensemble des variables.*

Le résumé des résultats de l'analyse simultanée de l'ensemble des variables est porté sur le tableau 14.

Le coefficient R est beaucoup plus faible dans la régression sous contrainte P que dans la régression usuelle ; ceci est dû au fait que l'on ne prend en compte, dans la régression sous contrainte P, que les variables influençant positivement le rendement, et cet effet est accentué par le fait que les variables les plus importantes (p. 100 de betteraves non marchandes et sodium dans le sol en p. 100 de saturation) ont un effet négatif sur le rendement.

Cette analyse qui confirme les résultats des traitements statistiques précédents, permet d'en faire la synthèse. Sur l'ensemble des variables prises en compte, on retrouve l'effet positif :

— de la densité des betteraves au m²,
— du bore dans les feuilles,
— de la durée de végétation,
— du phosphore du sol et du phosphore des feuilles,

tandis que :

— le p. 100 de betteraves non marchandes,

et à un degré moindre,

— le p. 100 de saturation en sodium des sols,
— le potassium, calcium et magnésium des feuilles,
— la quantité d'eau d'irrigation sont liés négativement aux rendements.

Les autres variables interviennent moins nettement, ou de façon secondaire, du fait de leur liaison à ces onze variables qui semblent les plus importantes pour expliquer le rendement, ce qui nous a conduits à les examiner dans le détail.

3. — EXAMEN DES PRINCIPALES VARIABLES

3. 1. — *Les betteraves non marchandes*

La figure 3 (1) montre que le pourcentage de betteraves non marchandes (diamètre < 45 mm) varie de 0 à 82 p. 100 avec une moyenne de 27 p. 100. Les rendements sont fortement liés à cette variable comme le révèlent les différentes analyses

(1) Les figures 1 à 13 ont été présentées dans la première partie de cet article (*Ann. agron.*, 1975, **26** (6), 709-740).

en régression. Cette variable apparaît liée à certaines techniques culturales (indice de dispersion lié au démariage). On note également une liaison avec l'humidité équivalente, elle-même dépendante du taux d'argile et de l'équilibre cationique dans le sol. Une faible conductivité de l'extrait 1/5 du sol correspond à un pourcentage de betteraves non marchandes inférieur à 20 p. 100 ; un taux d'argile de 17 à 27 p. 100 ou de forts taux d'argile, correspondent à un faible pourcentage de betteraves non marchandes.

3. 2. — *La compétition intraspécifique*

3. 2.1. *La densité* varie de 4 à 13,8 betteraves au m² (fig. 5). On constate que 27 p. 100 des stations étudiées se trouvent dans la fourchette de 80 à 97 000 pieds/hectare, préconisée par les services techniques du périmètre de mise en valeur. Mais la densité ne suffit pas à caractériser le phénomène ; pour une même densité, on peut avoir une dispersion très différente des betteraves sur la ligne.

3. 2.2. *L'indice de dispersion* I_D varie de 0,13 à 1,63 avec une valeur moyenne de 0,51 (fig. 4) ; on note que 30 p. 100 des stations ont une dispersion assez régulière des betteraves ($I_D < 0,36$). Les stations de faible densité ont une répartition irrégulière des betteraves sur la ligne. La corrélation entre I_D et la densité est nette : $r = -0,32^{++}$. D'une façon générale, la mauvaise distribution des betteraves peut s'expliquer par des semis irréguliers, une mauvaise levée ou un démariage défectueux, mais aussi par une forte mortalité des betteraves après démariage (ce qui concorde avec la relation négative entre la densité et l'indice de dispersion). On note une relation significative entre I_D et la quantité d'eau ($r = 0,33)^{++}$, le pourcentage d'argile ($r = 0,22)^{+}$. Un excès d'eau, un pourcentage d'argile élevé, semblent provoquer une forte irrégularité de la distribution des betteraves. Cette relation peut s'expliquer par une asphyxie temporaire des racines provoquant une mortalité des jeunes betteraves après le démariage. Sur la figure 22, on remarque de fortes pluies en janvier et mars (données climatiques de la station I.N.R.A.A. d'El-Khémis.

3. 3. — *Durée de végétation*

Sur le Haut Chéliff, la durée de végétation observée varie de 150 à 245 jours avec une moyenne de 207 jours (cf. fig. 12). A El-Khémis, on peut distinguer deux grandes périodes de semis :

— entre le 15 octobre et le 15 janvier : betteraves d'automne,
— entre le 15 janvier et le 20 février : betteraves d'hiver.

Le début de la récolte commence en juillet et il s'agit d'assurer un approvisionnement régulier de la sucrerie (1 500 t/j) ; le tableau 16 (p. 80) montre la relation entre la durée du cycle végétatif et les rendements en racines.

L'ensemble des analyses statistiques montre l'importance de ce facteur qui se classe en 4e position pour sa contribution à l'axe des rendements lors de l'analyse factorielle des correspondances et en 6e position lors de l'analyse en régression progressive.

On pourrait craindre que ce facteur traduise en fait l'influence des variétés,

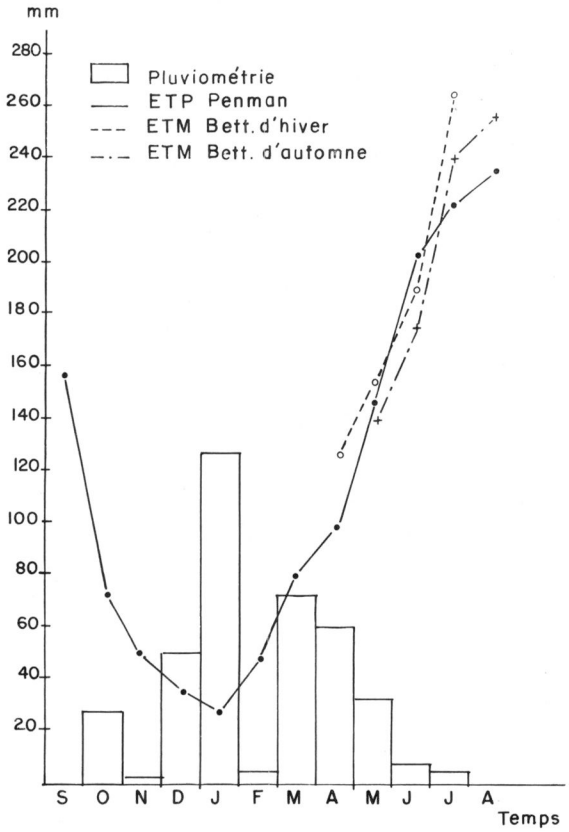


FIG. 22. — *Évolution de la pluviométrie et de l'évapotranspiration dans le Haut Chéliff, campagne 1970-1971*
(d'après J. C. LEGOUPIL, I.N.R.A.A., El-Khémis)

les variétés précoces pouvant être les plus productives. En fait, des variétés précoces comme KWSAA donnent des rendements faibles ; il semble donc que la liaison durée de végétation-rendement traduise effectivement l'action du cycle végétatif.

Les rendements diminuent de 15 p. 100, des betteraves d'automne aux betteraves d'hiver. La durée totale du cycle agit plus fortement pour les betteraves d'hiver. La corrélation durée de végétation/rendement est de $r = 0{,}47^{++}$; son influence est moins marquée pour les betteraves d'automne ($r = 0{,}20)^{+}$. Pour les semis d'hiver, il semble qu'un léger retard au semis ne permette plus à la betterave d'accomplir son cycle végétatif complet avant les grosses chaleurs estivales.

3. 4. — *L'irrigation*

Il n'est pas aisé de suivre l'irrigation des stations et l'état hydrique du sol tout au long de la campagne étudiée. Matériellement, il est impossible d'effectuer un contrôle après chaque irrigation, aussi avons-nous arbitrairement choisi de vérifier l'apport d'eau après une irrigation choisie au hasard, début juillet. Ont été

mesurées les humidités des différents horizons 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm, avant et après irrigation. La variable « quantité d'eau » (x_9) représente l'eau apportée dans les 50 cm de surface par une irrigation en juillet ; globalement, l'analyse en régression indique une relation négative entre la variable x_9 et les rendements. Cette liaison paradoxale peut s'expliquer par :

— une salinisation liée aux quantités d'eau apportées : on remarque une liaison faible ($r = 0{,}13$) entre la variable « quantité d'eau » et le sodium dans les feuilles ;

— une asphyxie temporaire des sols, liée à une mauvaise perméabilité.

Nous avons pu contrôler que certains horizons de surface pouvaient atteindre 130 p. 100 de leur capacité de rétention en eau 24 heures après irrigation, alors que les horizons profonds étaient secs, ce qui nous a conduits à examiner de façon plus détaillée l'effet de l'irrigation.

Nous avons calculé les corrélations entre l'humidité des différents horizons *avant irrigation* et les rendements en sucre par station. Ces variables reflètent partiellement *les déficits hydriques cumulés* avant l'irrigation.

Corrélation rendement/humidité avant irrigation :

Horizons :	0-10 cm	$r = 0{,}28^{++}$
	10-30 cm	$r = 0{,}29^{++}$
	30-50 cm	$r = 0{,}32^{++}$

On remarque une relation nette entre l'humidité des horizons profonds et les rendements.

Les résultats de l'enquête doivent être vérifiés. Une nouvelle enquête, limitée à un nombre plus faible de stations, pourrait permettre de contrôler l'eau apportée, l'engorgement éventuel des horizons de surface et le comportement des betteraves. Quoiqu'il en soit, l'irrigation ne semble pas maîtrisée dans ces sols à texture lourde. Si notre hypothèse d'un engorgement des sols est confirmée, il faudra envisager une diminution de la pluviométrie horaire des asperseurs.

3. 5. — *La salinisation*

L'eau d'irrigation contient en moyenne 1,6 g de sel/l, c'est-à-dire que, pendant une campagne, l'irrigation apporte approximativement 8 tonnes de sels à l'hectare. Le sel s'accumule dans les sols et les pourcentages de saturation en sodium varient de 0,8 à 18 p. 100 ; 87 p. 100 des stations (cf. fig. 7, 1re partie, p. 720) ont un niveau de salinisation inférieur à 8 p. 100. Les prélèvements ont été effectués en janvier ; les prélèvements effectués en juillet, sur quelques stations, montrent que les teneurs en sodium sont plus élevées en été, sans doute par suite des apports de sels pendant la campagne en cours et des remontées liées à l'évaporation intense :

Pourcentages de saturation en sodium :

Parcelle	R 50	3,6 p. 100 de Na en janvier, 6 p. 100 en juillet
—	M 68	6,0 p. 100 de Na en janvier, 11 p. 100 en juillet
—	O 39	12,8 p. 100 de Na en janvier, 16,5 p. 100 en juillet

L'enquête nous a permis de connaître le nombre de campagnes, avant 1970-1971, pendant lesquelles les parcelles ont été irriguées. On peut alors reconstituer la ciné-

tique d'accumulation du sodium (fonction des quantités d'eau reçues). Sur la figure 23, on note un accroissement important du niveau de salinisation avec les deux premières campagnes, puis les teneurs en sodium semblent se stabiliser (les points portés sur la figure 23 représentant les valeurs moyennes pour 7 stations ayant *eu la même histoire* depuis la mise en irrigation du périmètre).

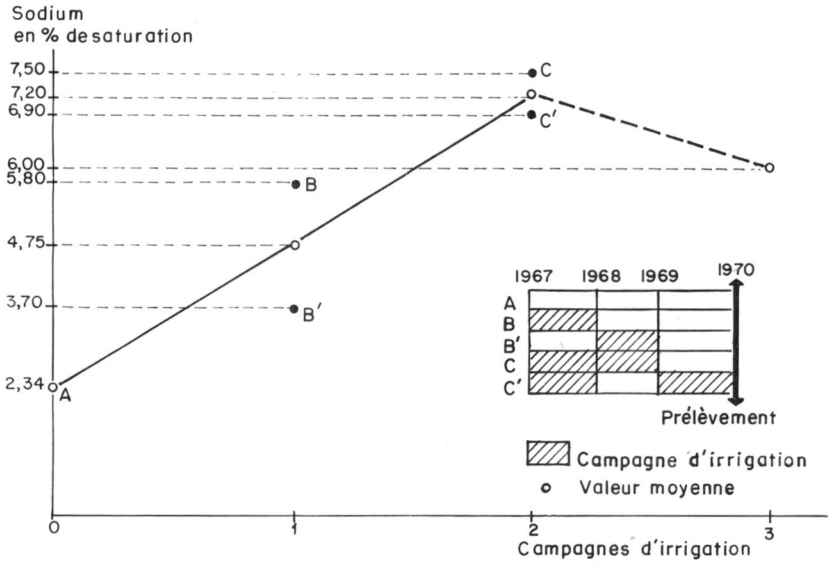


FIG. 23. — *Accumulation du sodium en fonction du nombre de campagnes d'irrigation*

Ces résultats sont comparables à ceux que VAN HOORN (1971) a obtenus en Tunisie. L'ensemble permet donc d'avoir assez rapidement une idée du processus de salinisation. La D.E.M.R.H. (1) a mis en place une étude expérimentale qui a confirmé nos premiers résultats globaux, en les précisant (PICON, 1975). On pourrait également effectuer une nouvelle enquête limitée à ce problème.

L'analyse statistique montre que l'accumulation du sodium a un effet dépressif sur les rendements. Alors que le sodium du sol est lié négativement aux rendements, on ne remarque aucune liaison entre le sodium des feuilles et le rendement. Ces résultats semblent indiquer que l'effet du sodium sur les propriétés physiques du sol a été plus déterminant que ses effets physiologiques. L'effet défavorable du sodium sur la stabilité structurale est confirmé par la corrélation négative qui existe entre les pourcentages de saturation en sodium et les pourcentages d'agrégats stables à l'alcool ($r = -0{,}19$) et la perméabilité ($r = -0{,}28^{++}$).

Une modification de l'assolement peut permettre un abaissement du pourcentage de saturation en sodium des horizons superficiels. Sur la figure 23, nous voyons que la présence d'une culture en sec, intercalée entre deux cultures en irrigué, conduit à un abaissement du niveau de salinisation. Ce résultat peut s'expliquer par l'action des pluies hivernales qui lessivent le sodium en profondeur. Si l'on considère le point

(1) D.E.M.R.H. : Direction de l'Environnement du Milieu et de la Recherche en Hydraulique, Birmandreis (Alger).

B (une campagne d'irrigation en 1967-1968, suivie de deux cultures en sec) et le point B′ (une campagne d'irrigation en 1968-1969, suivie d'une culture en sec), le niveau moyen est de 3,7 p. 100 pour les stations B et de 5,8 p. 100 de saturation en sodium pour les stations B′. Les lessivages hivernaux ont été plus importants en B qu'en B′. Cet effet du lessivage par les pluies peut être accentué par une irrigation en début de printemps. L'examen de la salinité de l'eau d'irrigation au cours de l'année montre que celle-ci passe par *un minimum* en mars-avril (fig. 24) ; cette période correspond, sur le périmètre, à la période de montaison des blés.

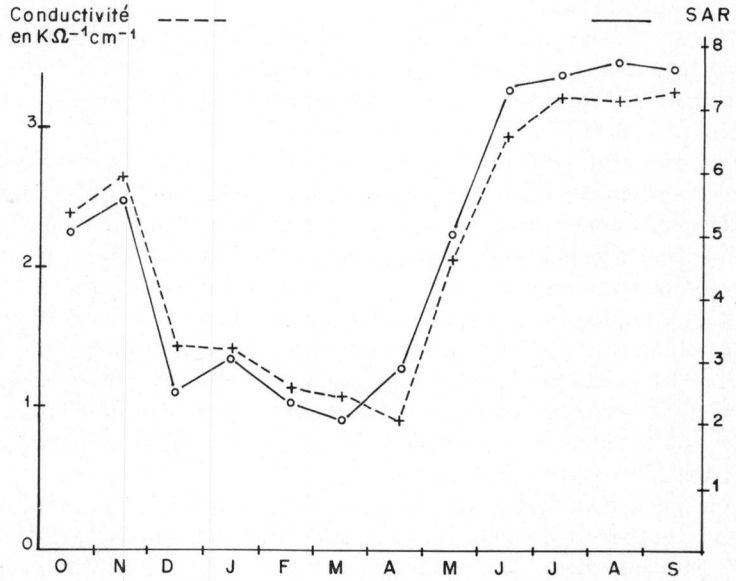


FIG. 24. — *Conductivité et SAR de l'eau d'irrigation*

On peut donc envisager, tout particulièrement pour les blés à haut potentiel, une irrigation de complément à la montaison qui, tout en améliorant les rendements du blé permettra un lessivage du sel. L'intérêt de cette suggestion a été vérifié par la station I. N. R. A. d'El-Khémis, qui a confirmé le double effet d'une irrigation en mars, sur blés mexicains : accroissement du rendement, lessivage du sodium dans les couches superficielles.

La régression multiple usuelle a également révélé une liaison négative entre le potassium des feuilles et les rendements. Le potassium des feuilles (voir fig. 9, p. 721) provient des réserves du sol ou des apports foliaires par l'eau d'irrigation (aspersion). Les sols du périmètre sont généralement bien pourvus en potassium. Le pourcentage de saturation en potassium de la capacité d'échange des sols varie de 1 à 10 p. 100, avec 85 p. 100 des stations qui possèdent un pourcentage supérieur à 3 p. 100. L'eau d'El-Khémis contient en moyenne 6 mg de K par litre. Il est possible que la relation constatée traduise, partiellement, l'effet global de la salinité. On ne remarque pas de relation entre les réserves potassiques du sol et les rendements. Sur un plan pratique, il semble que les fumures potassiques appliquées en 1970/1971 (100 kg K_2O/ha) doivent être réexaminées. Des fumures potassiques plus faibles

peuvent être envisagées malgré les besoins en potasse importants de la betterave, si l'on tient compte des réserves des sols et des apports par l'eau d'irrigation (30 kg/ha/an, en moyenne).

3. 6. — *Le phosphore*

Les réserves phosphoriques des sols ont été évaluées par la méthode Joret et Hébert (1955). Nous avons choisi cette méthode parce que, en sols calcaires, BENAMARA (1971) a montré qu'elle donnait les résultats les mieux corrélés avec la réponse d'une culture test à l'apport de phosphore ; ce qui est en accord avec les résultats obtenus par GACHON (1969).

Les teneurs en phosphore des sols varient de 20 à 360 p.p.m. de P_2O_5, 45 p. 100 des sols possèdent moins de 45 p.p.m. de phosphore (fig. 6). En sol calcaire, ces teneurs peuvent être considérées comme faibles. Les teneurs en phosphore des feuilles varient de 0,15 à 0,32 p. 100 de matière sèche (fig. 10).

La régression sous contrainte positive montre l'effet des réserves phosphoriques du sol sur les rendements et, de façon plus nette, celui du phosphore des feuilles. Étant donné le rôle joué par le phosphore, nous avons tenté de mettre en lumière les relations entre la nutrition phosphatée (phosphore des feuilles) et les facteurs du milieu.

On note une corrélation positive ($r = +0{,}28)^{++}$ entre le phosphore des feuilles et les réserves phosphatées du sol. Ce phosphore du sol est lui-même fortement corrélé avec le potassium ($r = +0{,}50)^{++}$ et le magnésium ($r = -0{,}31)^{++}$ des sols. Il est possible que ces relations s'expliquent par la présence de phosphates plus ou moins solubles.

Une analyse en régression sous contrainte positive P, confirme la relation entre la nutrition phosphatée et le phosphore du sol. On remarque cependant (tabl. 15) que ce facteur n'est pas déterminant.

On voit que le pourcentage de phosphore des feuilles est lié aux teneurs en azote des sols et au rapport argile/limon. Ces variables conditionnent la stabilité structurale des sols et, par conséquent, l'enracinement de la Betterave et l'utilisation des réserves phosphoriques des sols.

Une analyse des correspondances entre les teneurs en phosphore du sol et les variables du milieu a dégagé une relation entre les teneurs en phosphore des feuilles et le test de stabilité après prétraitement à l'eau. Au niveau du peuplement, on note une liaison négative entre l'indice de dispersion, la densité des betteraves et les teneurs en phosphore des feuilles. Ces résultats traduisent l'effet de la compétition intraspécifique sur la nutrition phosphatée. En ce qui concerne la teneur azotée des feuilles, on note une synergie entre l'absorption de l'azote et celle du phosphore.

L'analyse dégage une corrélation négative entre le phosphore dans les feuilles et les teneurs en sodium, calcium, magnésium. Nous avons émis deux hypothèses pour expliquer ces liaisons :

— ces cations sont accompagnés par des anions, Cl^- et SO_4^{--} en particulier, qui sont antagonistes des ions PO_4^{---} lors de l'absorption racinaire ;

— il y a une dégradation de la structure du sol liée à l'accumulation du sel (sodium en particulier) ; il en résulte un mauvais enracinement, donc une mauvaise absorption du phosphore.

Sur un plan pratique, d'une façon générale, pour les sols les plus pauvres, il convient de réviser la fumure phosphatée. Celle-ci devrait être renforcée pour les sols qui présentent une mauvaise structure et des teneurs en sodium élevées.

TABLEAU 15

Résultats de l'analyse en régression sous contrainte positive de deux variables liées à la nutrition, le phosphore et le bore, en fonction de plusieurs facteurs du milieu :

P : influence positive de ces facteurs
N : influence négative de ces facteurs

x_i	Variables	Phosphore plante				Bore plante			
		P		N		P		N	
		a_i	t_i	a_i	t_i	a_i	t_i	a_i	
3	Densité	0		0,12	1,12	0		0,13	1,19
4	Indice de dispersion	0,10	0,93	0		0		0,18	1,70
5	Durée de végétation	0		0,19	1,22	0,11	0,71	0	
6	Nombre de jours semis-démariage	0		0,007	0,05	0,01	0,08	0	
7	Déficit de pression aux asperseurs	0		0,145	1,32	0		0	
8	Humidité équivalente	0		0		0		0,17	1,59
9	Quantité d'eau	0		0,22	2,05	0,17	1,75	0	
10	N sol	0,15	1,49	0		0,056	0,54	0	
11	P sol	0,24	2,3	0		0,17	1,64	0	
12	Na p. 100 de saturation	0		0,066	0,61	0,28	2,72	0	
19	Argile/Limon	0,18	1,46	0	0	0,12	1,04	0	
20	Indice de stabilité	0		0,03	0,31	0		0,30	2,49
21	Perméabilité	0		0		0,25	2,20	0	
22	Agrégats stables (%) (test benzène)	0,06	0,52	0		0		0,13	1,11
	Constante	3,80	4,70	3,50	4,19	0,59	3,42	2,45	2,03
		R = 0,33		R = 0,35		R = 0,46		R = 0,34	

Légende : cf. tableau 12.

3. 7. — *Le bore*

L'ensemble des traitements statistiques ont mis en lumière la relation positive entre cet élément dans les feuilles et les rendements.

Nous n'avions analysé le bore dans le sol que pour quelques stations. Les teneurs en bore (extraction à l'eau bouillante) varient de 0,17 à 0,80 p.p.m. de bore soluble à l'eau bouillante pour les 30 échantillons retenus.

Dans les feuilles, les teneurs varient de 28 à 56 p.p.m.(fig. 11) avec une valeur moyenne de 40 p.p.m. Lorsqu'on tente d'« expliquer » les teneurs en bore par les autres variables du milieu, on remarque (tabl. 15) des relations positives entre l'absorption du bore et les teneurs en azote, en sodium et en phosphore du sol. De même, une bonne perméabilité et un raport argile/limon élevé, signes d'une bonne stabilité structurale, sont liés positivement à l'alimentation en bore.

Il semble donc qu'une bonne alimentation de la plante liée à une bonne structure des sols, favorise la nutrition boratée. De même, l'humidité du sol (x_9) conditionne l'absorption du bore. Cet effet de l'état hydrique du sol peut expliquer la relation teneur en bore-durée de végétation. On conçoit que les betteraves d'automne se développent dans des conditions de sols plus humides que les betteraves d'hiver semées plus tardivement.

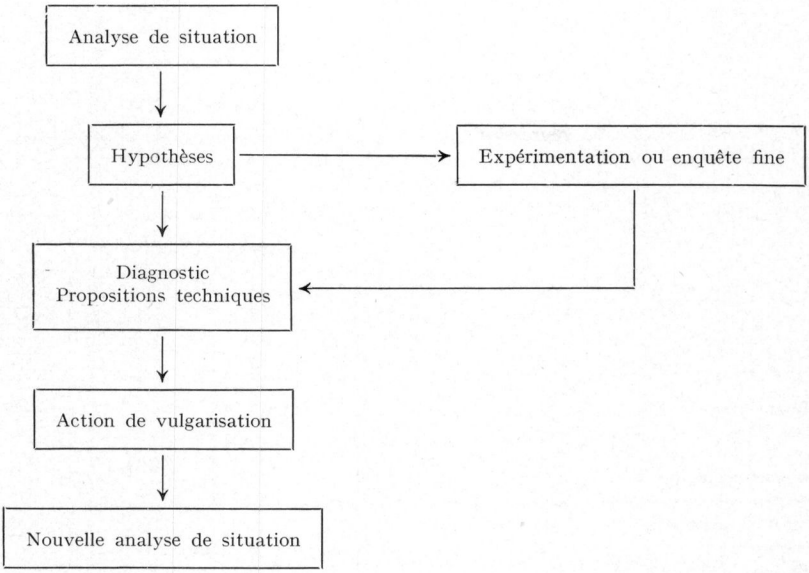
Sur un plan pratique, pour les parcelles où les feuilles de betteraves présentent les teneurs en bore les plus faibles, il faut effectuer des apports de bore comme le conseillent les services techniques du périmètre.

4. — CONCLUSIONS

L'enquête se proposait plusieurs objectifs : pédagogiques, méthodologiques, pratiques.

4. 1. *Au niveau pédagogique*, l'analyse du système population de betteraves-milieu-techniques a permis aux étudiants d'appréhender la cohérence de cet ensemble à partir d'un travail en vraie grandeur. L'étude d'un cas concret a permis également d'associer l'enseignement aux processus du développement dans le cadre d'une pédagogie active. Ce type de recherche apparaît donc particulièrement adapté aux laboratoires de recherches ayant une fonction d'enseignement. Il aboutit à une réflexion au niveau de la rationalisation des actions de développement ; schématiquement on peut envisager les différentes phases suivantes (schéma ci-après).

L'étude globale peut donc déboucher sur une programmation de recherches ayant pour but de répondre aux questions posées par l'enquête. Dans notre cas, plusieurs thèses de spécialisation, réalisées par les étudiants, ont complété l'enquête : étude de la casside et moyens de lutte, étude de l'absorption du phosphore par la betterave en liaison avec la salinisation du sol, étude de la production du ray-grass dans le cadre d'une diversification fourragère des assolements. L'étude globale débouche également, lorsque les solutions techniques sont connues, sur des actions de vulgarisation portant sur les freins qui bloquent la production.



4. 2. *Au niveau méthodologique*, les témoignages des chefs de culture, les observations stationnelles, les mesures au champ ou en laboratoire, permettent de réunir une masse d'informations.

Il convient de ne pas perdre de vue l'importance de la caractérisation de la variable étudiée.

L'échantillonnage doit permettre une description correcte de la variable étudiée : par exemple, la densité des betteraves au mètre ne suffit pas à caractériser la compétition intraspécifique ; il convient également de tenir compte de la régularité de la distribution des betteraves sur la ligne, qui dépend de la structure du peuplement. D'autre part, l'absence de liaison entre les attaques de casside et les rendements peut être due à une mauvaise caractérisation de cette variable.

L'ensemble des données collectées donne une image de la situation, mais au-delà de cette description, il s'agit de dégager les relations entre variables, « d'expliquer » les rendements. On se heurte alors à deux difficultés au niveau du traitement :

— certaines variables sont qualitatives, d'autres quantitatives ;
— les variables prises en compte peuvent présenter des interactions.

L'analyse factorielle des correspondances a permis l'analyse statistique simultanée des variables quantitatives et qualitatives. Cette méthode est donc synthétique, mais ne permet pas de déterminer à partir de quelles limites les liaisons qu'elle dégage sont significatives. Les analyses en régression évitent l'inconvénient précédent mais sont limitées aux variables quantitatives. On le voit, les différentes méthodes que nous avons utilisées apparaissent complémentaires. La confrontation des résultats obtenus avec les quatre méthodes, pour les variables communes, montre une assez bonne convergence (tabl. 16).

Notons que Gras *et al.* (1971) ont utilisé une méthode de régression avec hypothèse linéaire généralisée à la prise en compte des facteurs qualitatifs. Ce traitement

TABLEAU 16

Variables liées aux rendements.
Comparaison des résultats des différentes méthodes

(Pour les analyses en régression, nous avons retenu les liaisons significatives au seuil 10 p. 100, et pour la régression pas à pas, au seuil 5 p. 100)

Variables	Méthodes d'analyse			
	Analyse des correspondances	Analyse en régression pas à pas	Analyse en régression sous contrainte	Analyse en régression simple
Pourcentage de betteraves de diamètre < à 45 mm	—	—	—	—
Na dans les feuilles	—			
Indice de dispersion	—	—	—	—
Durée de végétation	+	+	+	+
Ca dans les feuilles	—			—
Pourcentage de sable grossier	+			
Quantité d'eau du sol après une irrigation	—	—	—	—
P dans les feuilles	+		+	
Pourcentage d'agrégats stables (après traitement alcool)	+			
Bore dans les feuilles	+	+	+	+
Déficit de pression aux asperseurs	—			
Nombre de jours semis-démariage	—			
Phosphore du sol	+		+	
Pourcentage de saturation en Na du sol	—		—	—
Densité du peuplement de betteraves	+	+	+	+
Test de perméabilité	+	+	+	+
K dans les feuilles	—		—	—

Les variables ont été classées en tenant compte des contributions à l'inertie de l'axe des rendements (analyse des correspondances).

synthétique, dans une équation générale, des variables de natures différentes est fort lourd à manipuler, et présente peut-être des inconvénients du point de vue des principes : on a une variable par modalité ce qui donne multiplication des variables qui risque de privilégier les variables qualitatives.

Les trois méthodes de régression se complètent bien et permettent de lever partiellement l'effet de masque dû aux interactions. La régression progressive montre les variables les plus importantes, mais possède un effet de masque assez marqué : si deux variables sont très liées entre elles et liées également au rendement, dès que l'une d'elles est sélectionnée l'autre est rejetée beaucoup plus loin, bien que l'influence de ces deux variables sur le rendement soit voisine. La régression sous contrainte permet de chercher les variables ayant un effet positif sur le rendement. Elle permet de vérifier les résultats de la régression usuelle et de faire ressortir les variables qui, du fait des interrelations (entre variables), n'étaient pratiquement pas intervenues dans la régression usuelle comme c'est le cas pour le phosphore des feuilles. La confrontation de ces trois techniques de régression, permet donc d'obtenir des résultats plus sûrs que ceux fournis par la régression classique. En outre, quand cette dernière est mauvaise (trop grand nombre de variables ou variables très corrélées), régression progressive et régression sous contrainte donnent de meilleurs résultats et peuvent être considérées comme des techniques de protection de la régression usuelle (CAZES, 1974).

Le carré du coefficient de corrélation fournit le pourcentage de la variation totale de la variable rendement expliquée par l'équation de régression, 50 p. 100 après le 5e palier de la régression progressive. Une partie de la variance non expliquée doit dépendre de variables non prises en compte dans notre traitement. Lorsque le nombre de variables explicatives est trop grand, la reconstitution de la variable à expliquer, les rendements en sucre par parcelles, devient illusoire comme nous l'avons souligné.

On est donc conduit à limiter le nombre des variables à introduire, ce qui implique un choix. En général, on choisit à partir d'un premier diagnostic de terrain et à partir des connaissances actuelles relatives aux facteurs. Par exemple, trois tests se combinent pour caractériser la stabilité structurale du sol ; la littérature montre que le test de stabilité après prétraitement au benzène rend assez bien compte de l'effet de la matière organique sur la stabilité structurale, ce qui nous a conduits à choisir cette variable pour l'analyse. En fait, les analyses statistiques ultérieures ont montré que le test avec prétraitement à l'alcool, que nous avions éliminé dans un premier temps, présentait une meilleure liaison avec les rendements. Un traitement manuel préalable des variables peut être très utile pour sélectionner les variables à retenir. Dans notre exemple, le calcul des corrélations de Pearson permet un choix judicieux.

4. 3. *Au niveau pratique*, l'étude a permis de dégager différents freins de la production. Il faut cependant souligner que ces résultats ont été obtenus dans des conditions qui étaient celles du périmètre d'El-Khémis pendant la campagne 1970/1971 ; il convient donc d'éviter une généralisation qui ne tiendrait pas compte de ces conditions spécifiques.

Globalement, l'analyse factorielle des correspondances et les analyses en régression ont donné, pour les variables communes, un classement assez proche (quant à leur explication des rendements). Dans le cas de l'analyse des correspondances, ce

classement a été obtenu à partir du calcul des contributions de chaque variable à l'inertie de l'axe des rendements en racines (tabl. 3).

Sur la figure 25, nous avons tenté de représenter, en les ordonnant, les liaisons entre les variables « explicatives » et les rendements. Il s'agit là d'un essai de synthèse hypothétique ; il faut en effet rappeler que l'analyse statistique ne permet pas d'affirmer que les liaisons qu'elle dégage sont des liaisons de causalité.

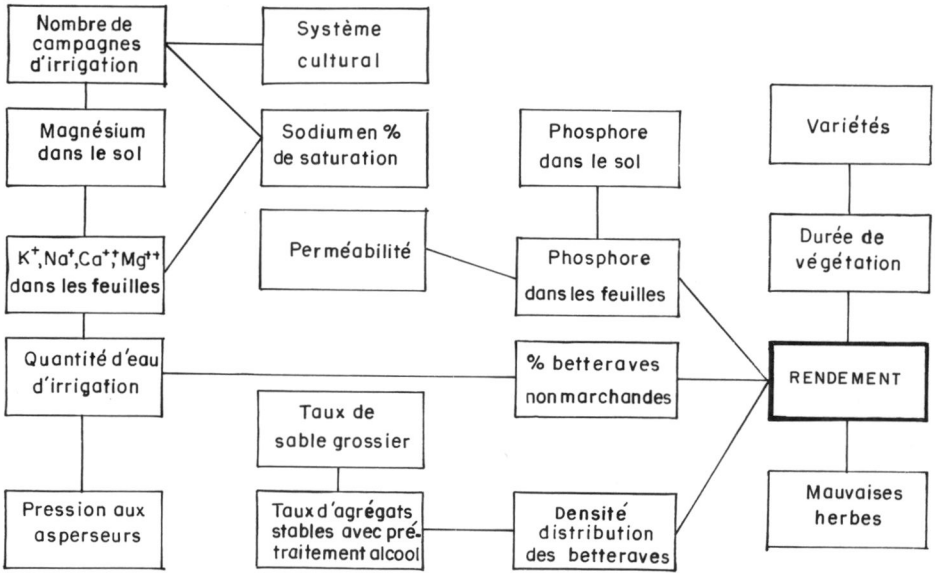


FIG. 25. — *Représentation schématique du système analysé* (principales variables liées au rendement)

L'étude globale a permis de dégager la cinétique moyenne de salinisation des sols, l'influence de la salinité sur la nutrition et la fertilisation, en particulier sur la fertilisation phosphatée et potassique.

L'importance accordée aux facteurs de la nutrition peut paraître excessive dans le cadre d'une enquête globale ; on peut, en effet, objecter qu'il existe des méthodes expérimentales plus efficaces et plus précises pour étudier ces facteurs. En fait, ces études négligent souvent l'influence de certains facteurs, tels que l'enracinement, la compétition, la stabilité structurale, sur la nutrition. Il s'agit là de facteurs difficiles à maîtriser dans le cadre d'un modèle expérimental plus ou moins simplifié.

Les travaux du sol étant assez uniformes sur le périmètre, nous n'avons pas intégré cette variable dans l'analyse. Cependant, l'effet de la stabilité structurale sur les rendements, la présence de forts pourcentages de betteraves fourchues ainsi que de betteraves non marchandes, nous amènent à penser qu'il serait nécessaire d'étudier le problème du travail du sol.

En ce qui concerne le système cultural, nous avons montré l'influence de la rotation sur les rendements. L'étude expérimentale des systèmes culturaux est longue et peu aisée. L'enquête globale nous a permis de dégager les relations entre les rotations et la salinisation des sols, les dates de labour, le salissement des parcelles par les mau-

vaises herbes, le parasitisme. De nouvelles enquêtes, en série chronologique, devraient permettre de mieux intégrer le facteur temps et d'appréhender ainsi l'évolution des systèmes.

Notre étude n'avait pas pris en considération les facteurs socio-économiques qui conditionnent certaines variables techniques ou écologiques, c'est pourquoi nous pensons qu'un tel travail devrait être élargi au système de production.

Reçu pour publication en octobre 1975.

SUMMARY

GLOBAL STUDY OF SUGAR-BEET CULTIVATION IN THE AREA OF THE UPPER CHELIFF. II. — REGRESSION ANALYSIS

The analysis of correspondences gave a first global approach of the system : sugar-beet population — environment — techniques, but does not reveal whether the relations observed are significant or not. The regression analysis with positive constraint or the stepwise regression contributed to specify the results of the analysis of correspondences by revealing in particular the relations existing between the sugar yield and the quantitative variables which indicate the intraspecific competition (density, dispersion index), the length of the vegetative cycle, the irrigation and the salinization. The regression analyses and the factorial analysis show concordant results and seem to be complementary.

ZUSAMMENFASSUNG

GESAMTUNTERSUCHUNG DER ZUCKERRÜBEKULTUR IM GEBIET DES OBERCHELIFFS. II. — REGRESSIONSANALYSEN

Die Analyse der Korrespondenzen führt zu einer ersten Gesamtannäherung des Systems : Rübenbestand — Umwelt-Techniken gestattet aber nicht zu schätzen, ob die dargelegten Verhältnisse signifikant sind. Die Regressionsanalysen mit positiver Beschränkung oder Stufe nach Stufe ergänzen die Ergebnisse der Analyse der Korrespondenzen beim Entdecken der Verhältnisse zwischen den Zuckererträgen und den quantitativen Variablen, die das intraspezifische Wettbewerb (Dichte, Dispersionsindex), die Dauer der vegetativen Entwicklung, die Bewässerung und die Versalzung bezeichnen. Die Regressionsanalysen und die faktorielle Analyse liefern übereeinstimmende Ergebnisse und scheinen ergänzend zu sein.

РЕЗЮМЕ

Общее изучение культуры сахарной свеклы в периметре Высокогорного Шелиффа. — II. Регрессивные анализы.

А. П. КОНЕЗА, П. КАЗ, Р. ТОМАССОНН, П. БАЙОН, Д. ХАДЖ-МИЛУД, К. МАЖИНИО, Г. ЛЕМЭР.

Анализ соответствий позволяет первое приближение к системе популяция свеклы — среда — технология культуры, но не помогает оценить

показательность выявленных сязей. Методы принудительно-положительного, или постепенного регрессивного анализа позволяют уточнить результаты анализов соответствий, в частности, выявив связи существующие между выходом сахара и количественными переменными, характеризующими межвидовое соревнование (плотность посева, дисперсионный показатель), длительность вегетативного цикла, орошение и степень засоления почвы. Регрессивные изучения и факториальный анализ дают совпадающие результаты, дополняя как-будто друг друга.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BENAMARA A., 1972. Étude de la fertilité phosphorique de quelques sols d'Algérie. *Mémoire I. N. A.*, El-Harrach.

CAZES J. P., 1974. Protection de la régression : régression sous contrainte. Séminaire. *Les statistiques appliquées à l'Agriculture.* I. N. A., El-Harrach (sous presse).

DECOURT N., GODRON M., ROMANE F., TOMASSONE R., 1969. Comparaison de diverses méthodes d'interprétation statistiques de liaison entre le milieu et la production de pin sylvestre en Sologne. *Ann. Sci. for.*, **26**, 413-443.

DEFFONTAINES J. P., GRAS R., 1968. Les facteurs techniques de la production de la Pêche tardive en Moyen Vivarais. *Ann. agron.*, **19** (1), 5-51.

DRAPPER N. R., SMITH P., 1966. *Applied regression analysis.* J. Wiley, New York, 408 p.

GACHON L., 1969. Les méthodes d'appréciation de la fertilité phosphorique des sols. *Bull. Assoc. fr. Étud. Sol.*, **4**, 17-31.

GRAS R., OSTY P. L., DEFFONTAINES J. P., MARIN-LA-FLÈCHE A., 1971. Contribution à l'étude de la culture de la Betterave à sucre sur des sols légers du Laonnois et de la Champagne de l'Aisne. *Ann. agron.*, **22** (5), 537-584.

HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. *Le profil cultural.* Masson Ed.

PICON B., 1975. Étude de l'évolution des sols sous irrigation (Haut Chéliff). Étude 113. Direction de l'Environnement du milieu et de la Recherche en Hydraulique (Alger).

VAN HOORN J., 1971. Irrigation par eaux saumâtres (Synthèse des travaux du CRUESI). Semaine d'Étude des problèmes méditerranéens, Gembloux. *Bull. Rech. agron. Gembloux*, nº H. S., 203-233.

Ann. agron., 1976, **27** (1), 85-99.

ÉVOLUTION DE LA MICROFLORE D'UN SOL IMPRÉGNÉ D'HYDROCARBURES

J. RIVIÈRE et C. GATELLIER
avec la collaboration technique de Marie-Claude FRANÇOIS

Laboratoire de Microbiologie,
Institut national agronomique, Paris-Grignon,
16, rue Claude Bernard,
75231 Paris Cedex 05

Laboratoire de Microbiologie,
Institut français du Pétrole,
1-3, avenue du Bois-Préau
92500 Rueil-Malmaison

RÉSUMÉ

Cette étude a porté sur l'évolution de la microflore d'un sol pollué par un déversement de gas-oil. Un semis de luzerne a ensuite été réalisé sur une partie de la surface polluée. Les analyses font ressortir une évolution lente caractérisée par une forte stimulation de la microflore totale, des Actinomycètes, et de la microflore utilisant les hydrocarbures. Parmi les groupes fonctionnels, les fixateurs d'azote, les dénitrifiants et les sulfatoréducteurs sont aussi stimulés. Il y a une augmentation considérable du pourcentage des bâtonnets Gram négatifs appartenant surtout au genre *Pseudomonas*. Ce sont des souches du genre *Arthrobacter* qui paraissent responsables de la fixation de l'azote. La culture de luzerne accélère la biodégradation des hydrocarbures et supprime l'effet défavorable de la dénitrification et de la sulfatoréduction.

I. — INTRODUCTION

Malgré l'existence d'une règlementation sévère et d'une formation professionnelle axée sur la sécurité, le développement de la consommation pétrolière s'est répercuté sur le nombre des incidents au cours du transport ou du stockage (ODIER, 1975). C'est ainsi que des pollutions locales du sol par des hydrocarbures ont été occasionnées lors de déversements accidentels.

Les études effectuées dans les rares cas observés, complétées par des expéri-

mentations faites sur le terrain, ont permis d'envisager une méthodologie de la restauration biologique des sols imprégnés de produits pétroliers.

On a d'abord observé que ces sols présentent une activité respiratoire plus élevée que les autres (DOBSON et WILSON, 1964 ; JONES *et al.*, 1970), et une augmentation de l'activité déshydrogénasique (GATELLIER *et al.*, 1974).

La population microbienne ne varie pas quantitativement, mais n'est plus la même ; un apport d'éléments fertilisants (azote, phosphore, potassium) active la respiration des sols ainsi imprégnés (ANTONIEWSKI et SCHAEFFER, 1972) et le nombre des bactéries utilisant les hydrocarbures (JOBSON *et al.*, 1974).

Cependant, alors que la microbiologie du pétrole est bien connue (DAVIES, 1967), peu de recherches se sont intéressées à l'évolution de la microflore des sols massivement pollués puisque ces pollutions sont rares. Des auteurs (RAISBECK, 1971 ; ODU, 1972) ont noté des changements dans la répartition de certains groupes nutritionnels en fonction du temps écoulé et des traitements effectués après la pollution.

Il y a aussi des modifications qualitatives, certains genres (*Aspergillus, Penicillium, Bacillus, Pseudomonas, Mycobacterium, Proactinomyces*) paraissant plus aptes à utiliser les hydrocarbures (KALASEVIC-KRAJOVAN et VRBASKI, 1971).

Mais des résultats intéressant l'ensemble des variations de l'écologie microbienne d'un sol pollué par des hydrocarbures sont rares (KAISER, 1973).

C'est pour ces raisons que ce travail a été fait à la suite d'une pollution massive survenue en août 1972. Un oléoduc a été sectionné lors du soussolage d'un terrain destiné à l'arboriculture, dans le Vaucluse. L'écoulement du gas-oil a duré quelques heures, la quantité répandue étant d'environ 550 mètres cubes, la surface polluée de l'ordre d'un hectare.

Pour faciliter la réduction de la teneur du sol en hydrocarbures, ces derniers atteignant des profondeurs de un à cinq mètres, on a installé un réseau d'arrosage à partir de la nappe phréatique et réalisé une culture de luzerne, tenant compte d'une expérience antérieure dont les résultats viennent d'être publiés (GUDIU et SYRATT, 1975). Mais il a fallu attendre 270 jours après la pollution, avant de prélever les premiers échantillons, de nombreux travaux de terrassement ayant été préalablement faits en vue de protéger la nappe phréatique.

Un peu plus tard, un sol d'une autre région a été pollué moins fortement par un carburant pour réacteur (JP 4). Une analyse microbiologique a pu être faite à partir d'un échantillon convenable, vingt jours seulement après la pollution. Bien que ce type de carburant ait un point initial de distillation inférieur de 30°C à celui du gas-oil, sa composition en hydrocarbures est assez voisine. C'est pourquoi on s'est permis de rapprocher les résultats obtenus de ceux du premier travail.

2. — MATÉRIEL ET TECHNIQUES

2. 1. — *Définition de la parcelle étudiée*

Les caractères physico-chimiques du sol de la parcelle polluée en août 1972 sont résumés dans le tableau 1 dans lequel on a également noté les caractères d'une parcelle voisine servant de témoin (analyse faite le 26-06-1973).

Les semis de luzerne ont été effectués en octobre 1973.

TABLEAU I

Caractéristiques physico-chimiques du sol de la parcelle polluée (essai) *et d'une parcelle voisine non polluée* (témoin)

Caractéristiques	Parcelles	
	Polluée (essai)	Non polluée (témoin)
Humidité à 105°C (%)	11	17
Granulométrie (‰)		
Argile < 2μ	140	124
Limon (2-20 μ)	204	331
Limon (20-50 μ)	220	258
Sable fin	413	245
Sable grossier	23	42
Terres fines	990	880
Cailloux	10	120
Matières organiques (%) ...	16,5	16,2
Carbone organique (%)	9,6	10,6
Azote (%)	0,72	0,77
Rapport C/N	13,3	13,7
pH eau	8,2	8,2
Calcaire total (%)	484	486
Calcaire actif (%)	75	95
Capacité d'échange.....	5,4	5,7
mV pour 100 g		
Ca	34,2	36,5
Mg	0,85	1,16
K	0,17	0,22
Na	0,03	0,03
P_2O_5 assimilable	0,001	0,01
Humiditié équivalente (%)	18,6	20,8
Sels solubles (%).....	0,62	0,64

2. 2. — *Dénombrement et isolement des souches*

Les techniques et les milieux sont résumés dans le tableau 2.

2. 3. — *Identification des souches*

Elle a été faite d'après les caractères donnés dans la 8e édition du Bergey's Manual of Determinative Bacteriology (BUCHANAN et GIBBONS, 1974).

Il faut noter que les bactéries fixant l'azote et utilisant les hydrocarbures ont été isolées, purifiées et identifiées d'après une technique déjà décrite (RIVIÈRE *et al.*, 1974).

2. 4. — *Dosage des hydrocarbures dans le sol pollué*

Il a été effectué par spectrométrie infra-rouge (norme AFNOR TQO-203) 990 jours après la pollution.

TABLEAU 2

Dénombrement et isolement des souches

Type de micro-organismes	Milieux	Références
Microflore totale	Extrait de terre Extrait de terre enrichi en glucose et sels minéraux Extrait de terre enrichi en acides aminés et facteurs de croissance Sélectif pour bâtonnets Gram négatifs	RIVIÈRE, 1963 SINGH-VERMA, 1967 SOUMARE et BLONDEAU, 1972 HOLDING, 1960
Microflore adaptée au gas-oil	Minéral C_4	OUDOT, 1975
Actinomycètes	Pomme de terre-glucose Glycérol, arginine, actidione	BD MÉRIEUX PORTER *et al.*, 1960
Champignons	Rose bengale Streptomycine	POCHON et TARDIEUX, 1962
Groupes fonctionnels responsables des cycles de l'azote et du carbone	Ammonifiants Amylolytiques Cellulolytiques aérobies Dénitrifiants Nitrificateurs	POCHON et TARDIEUX, 1962
Fixateurs d'azote (nitrogénase)	Acétate Mannitol	BALANDREAU, 1975
Réducteurs de sulfates	Minéral liquide	GATELLIER, 1962

3. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

La discussion porte sur les résultats de l'analyse des échantillons parvenus au laboratoire et prélevés par les soins de la société exploitant l'oléoduc.

Pour les raisons exposées dans l'Introduction, il ne semble pas qu'il ait été possible de faire un prélèvement convenable avant 270 jours. On peut cependant regretter que les prélèvements n'aient pas été un peu plus fréquents et régulièrement espacés.

En vue d'obtenir une comparaison de l'évolution des processus microbiens au cours du temps, on a calculé, lors de chaque analyse, le rapport $\frac{P}{T}$ du nombre de germes revivifiables dans un gramme de sol pollué au nombre de germes revivifiables dans un gramme de sol témoin.

3. 1. — *Évolution de la microflore totale*

Les résultats sont résumés dans le tableau 3. Dans le cas d'un sol pollué non cultivé, on observe, dès la première analyse, une stimulation qui se maintient jusqu'à la dernière analyse (l'expérimentation a été arrêtée lorsqu'il n'y avait plus

TABLEAU 3

Dénombrement des divers types microbiens en fonction du temps écoulé après la pollution dans un sol cultivé (luzerne) *ou non*

Date du prélèvement	Temps écoulé en jours	Microflore totale (gélose à l'extrait de terre) 10^6/g			Actinomycètes (gélose à l'actidione) 10^6/g			Champignons 10^4/g			Microflore utilisant les hydrocarbures du gas-oil 10^6/g		
		T	P	P/T	T	P	P/T	T	P	T/P	T	P	P/T
Sol non cultivé													
Mai 1973	270	42	470	11,2	—	—	—	1	1,8	1,8	0,015	1,4	93,3
Septembre 1973	390	10	137	13,7	5,7	8,8	1,5	3	1	0,3	0,150	140	933,3
Mai 1975	990	22	209	9,5	15,4	164	16,5	80	25	0,3	0,010	4,5	450
Sol cultivé (luzerne)													
Mars 1974	660	87	38	0,4	47	29	0,6	10	30	0,3	0,010	1,5	107
Septembre 1974	840	33	12	0,4	81	90	0,9	71	11	0,1	—	—	—
Mai 1975	990	36	98	2,9	36	81	2,2	33	4	0,1	0,025	9,5	375

— : dénombrements non effectués.
T : sol témoin.
P : sol pollué.

TABLEAU 4

Dénombrement des divers groupes fonctionnels du cycle de l'azote en fonction du temps écoulé après la pollution dans un sol cultivé (luzerne) *ou non*

Date du prélèvement	Temps écoulé en jours	Bactéries fixatrices d'azote aérobies (10^2/g)			Bactéries fixatrices d'azote anaérobies (10^2/g)			Bactéries ammonifiantes (10^6/g)			Bactéries nitrifiantes (10^3/g)			Bactéries dénitrifiantes (10^4/g)		
		T	P	P/T	T	P	P/T	T	P	P/T	T	P	T/P	T	P	P/T
Sol non cultivé																
Mai 1973	270	2,5	1 100	440	4,5	110	25	—	—	—	1	1	1	450	4 500	10
Septembre 1973	390	140	14 000	100	1	2,5	2,5	14	4,5	0,3	2 800	2 800	1,4	0,1	4 500	45 000
Mai 1975	990	9,5	0,9	0,1	9,5	25	2,6	2,5	2,5	1	—	—	—	0,01	9	900
Sol cultivé																
Mars 1974	660	14	4,5	0,3	2,5	4,5	0,5	140	140	1	2 800	600	4,6	11 000	250	0,02
Septembre 1974	840	9,5	45	0,2	—	—	—	25	25	1	40	3	13,3	250	25	0,10
Mai 1975	990	2,5	0,45	5	0,25	2,5	0,1	9,5	4,5	2,1	1,3	3	0,4	2 000	95	0,21

— : dénombrements non effectués.
T : sol témoin.
P : sol pollué.

TABLEAU 5

Dénombrement de divers groupes fonctionnels du cycle du carbone et du cycle du soufre en fonction du temps écoulé après la pollution dans un sol cultivé (luzerne) *ou non*

Date du prélèvement	Temps écoulé en jours	Bactéries amylolytiques (10^4/g)			Bactéries cellulolytiques aérobies (cellules/g)			Bactéries sulfato réductrices (cellules/g)			Bactéries oxydantes du soufre (cellules/g)		
		T	P	P/T	T	P	P/T	T	P	P/T	T	P	P/T
Sol non cultivé													
Mai 1973	270	11	140	13	95	45	2,1	4	4	1	25	25	1
Septembre 1973	390	7,5	140	19	20	—	—	7	150	21	1 400	1 400	1
Mai 1975	990	95	45	2,1	95	450	4,7	4	2 500	625	1 400	1 400	1
Sol cultivé (luzerne)													
Mars 1974	660	150	14	0,1	1 100	250	0,4	450	90	0,2	14 000	11 000	0,8
September 1974	840	950	2 500	2,6	300	950	3,1	45	15	0,3	9 500	11 000	1,1
Mai 1975	990	—	—	—	—	—	—	15	25	1,6	—	—	—

— : dénombrements non effectués.
T : sol témoin.
P : sol pollué.

d'hydrocarbures dans la parcelle cultivée). Les Actinomycètes ne sont stimulés qu'à la fin, tandis que les champignons ne paraissent pas être mis en cause dans les conditions étudiées. Il y a, par contre, une augmentation considérable du nombre des bactéries utilisant les hydrocarbures du gas-oil qui représentent 100 p. 100 de la microflore totale 390 jours après la pollution.

Quand le sol pollué est cultivé en luzerne, seule la microflore utilisant les hydrocarbures reste stimulée, mais elle ne représente jamais plus de 10 p. 100 de la microflore totale.

3. 2. — *Évolution des divers groupes fonctionnels*

Les résultats sont résumés dans les tableaux 4 et 5.

Dans le cas d'un sol pollué non cultivé, on observe une stimulation d'abord des bactéries fixatrices d'azote, ensuite des bactéries dénitrifiantes, et à la fin, des bactéries sulfato-réductrices. Il y a aussi une légère stimulation des bactéries amylolytiques.

Lorsque le sol pollué est cultivé en luzerne, il n'y a plus de différences nettes.

3. 3. — *Répartition des genres bactériens en fonction du temps*

Un schéma général permettant l'identification des principales souches bactériennes isolées a déjà été décrit (RIVIÈRE *et al.*, 1970).

En tenant compte de la 8e édition du Bergey's Manual of Determinative Bacteriology (BUCHANAN et GIBSON, 1974), des modifications (résumées dans le tabl. 6)

TABLEAU 6

Caractères d'identification des bâtonnets ou coccobacilles Gram négatifs aérobies et anaérobies facultatifs (BUCHANAN, GIBBONS, 1974)

Genres	Bâtonnets		Pigmentation	Mobilité	Cils		Métabolisme du glucose		Type respiratoire		Oxydase	Autres caractères fréquemment rencontrés
	droits	incurvés			polaires	péritriches	respiratoire	fermentaire	aérobie strict	anaérobie facultatif		
Pseudomonas	+	+	d	+	+	—	+	—	+	—	d	
Xanthomonas.....	+	—	+	+	+	—	+	—	+	—	d	Production d'hydrogène sulfuré
Alcaligenes.....	+	—	—	+	—	+	+	—	+	—	+	
Acinetobacter	+	—	—	—	—	—	+	—	+	—	—	
Moraxella.....	+	—	—	—	—	—	—	—	+	—	+	
Chromobacterium .	+	—	+	+	d	d	d	d	d	d	d	pigment violet
Flavobacterium ...	+	—	+	d	—	+	+	—	d	d	d	

+ : présence. — : absence. d : variable.

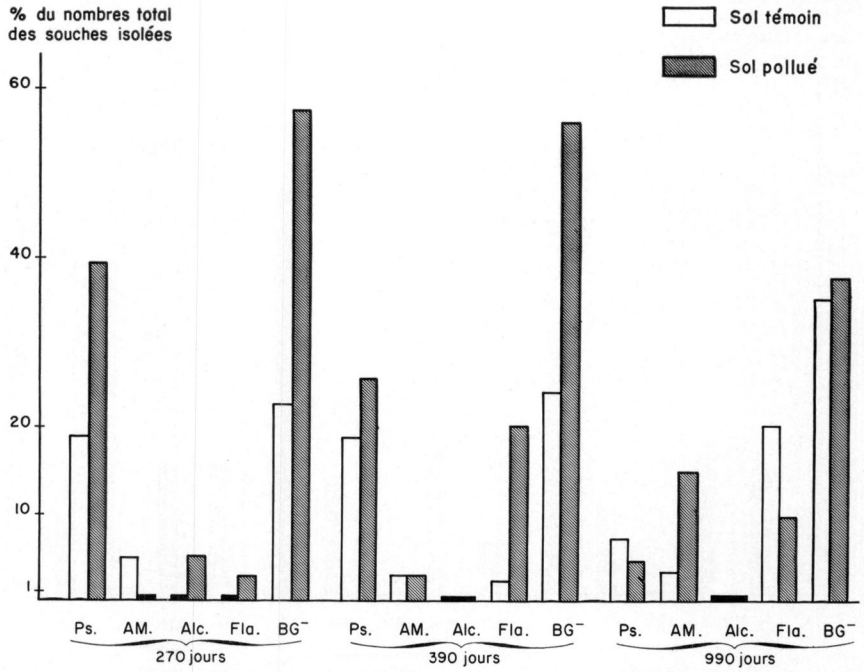


FIG. 1. — *Répartition des genres bactériens* (en pourcentage du nombre total des souches isolées) *dans un sol non cultivé en fonction du temps écoulé après la pollution*

Ps. = *Pseudomonas*
AM. = *Acinetobacter* + *Moraxella*
Alc. = *Alcaligenes*
Fla. = *Flavobacterium*
BG⁻ = Pourcentage total des bâtonnets Gram négatifs

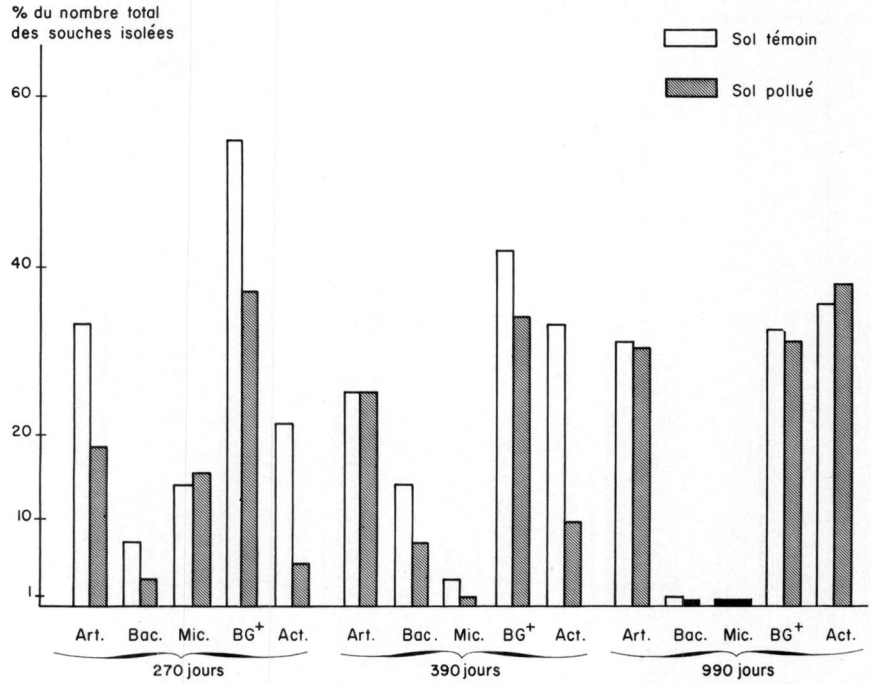


FIG. 2. — *Répartition des genres bactériens* (en pourcentage du nombre total des souches isolées) *dans un sol non cultivé en fonction du temps écoulé après la pollution*

Art. = *Arthrobacter*
Bac. = *Bacillus*
Mic. = *Micrococcus*
BG⁺ = Pourcentage total des bactéries Gram positives
Act. = Actinomycètes

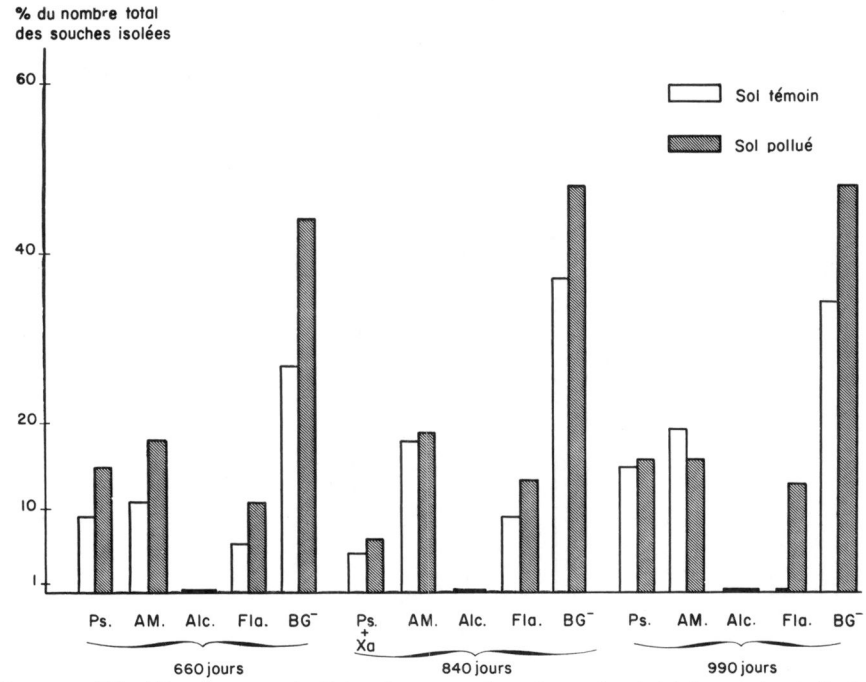


FIG. 3. — *Répartition des genres bactériens* (en pourcentage du nombre total des souches isolées) *dans un sol cultivé* (luzerne) *en fonction du temps écoulé après la pollution*

Ps. = *Pseudomonas*
Xa. = *Xanthomonas*
AM. = *Acinetobacter* + *Moraxella*
Alc. = *Alcaligenes*
Fla. = *Flavobacterium*
BG⁻ = Pourcentage total des bâtonnets Gram négatifs

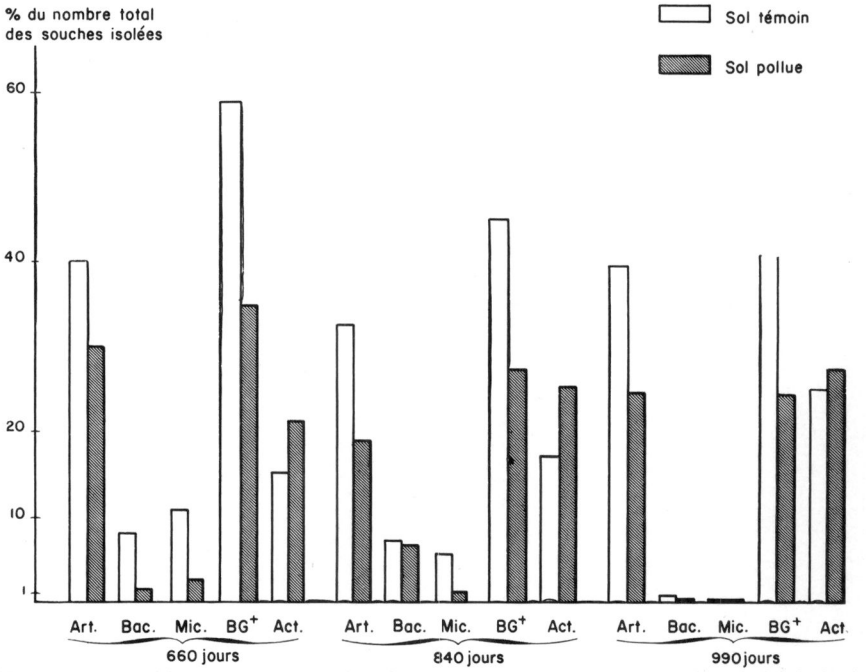


FIG. 4. — *Répartition des genres bactériens* (en pourcentage du nombre total des souches isolées) *dans un sol cultivé* (luzerne) *en fonction du temps écoulé après la pollution*

Art. = *Arthrobacter*
Bac. = *Bacillus*
Mic. = *Micrococcus*
BG⁺ = Pourcentage total des bactéries Gram positives
Act. = Actinomycètes

ont été apportées à la caractérisation des genres appartenant au groupe des bâtonnets ou coccobacilles Gram négatifs retrouvés dans les sols étudiés.

Les résultats obtenus dans le cas d'un sol pollué non cultivé sont résumés dans les figures 1 et 2. On note qu'il y a un changement net dans la répartition des genres microbiens présents, se caractérisant dès la première analyse par l'augmentation du pourcentage des bâtonnets Gram négatifs, la diminution de celui des bactéries Gram positives, et la presque disparition des Actinomycètes. Au fur et à mesure que le temps s'écoule, les différences s'estompent. Après 990 jours, tout paraît normal. Parmi les bâtonnets Gram négatifs, ce sont les souches appartenant au genre *Pseudomonas* qui sont les plus nombreuses dans un sol pollué, confirmant des observations déjà anciennes (KONOVALTSCHIKOFF-MAZOYER et SENEZ, 1956).

Dans le cas d'un sol pollué cultivé en luzerne (fig. 3 et 4), l'augmentation du pourcentage des bâtonnets Gram négatifs se maintient jusqu'à la fin. La pollution s'ajoute à l'effet rhizosphère (RIVIÈRE, 1963).

Les résultats concernant la teneur en hydrocarbures d'un sol pollué (tabl. 7) font ressortir le rôle de la luzerne qui favorise l'autoépuration d'un sol pollué par des hydrocarbures.

TABLEAU 7

Détermination de la teneur en hydrocarbures d'un sol pollué cultivé (luzerne) *ou non, 990 jours après la pollution*

Type de sol	Teneur en hydrocarbures mg/kg
Sol témoin	150
Sol pollué	17 300
Sol pollué cultivé en luzerne	206

TABLEAU 8

Étude de la microflore d'un sol pollué par un carburant pour réacteur 20 jours après la pollution

Types microbiens ou groupes fonctionnels (10^6/g)		Genres bactériens en p. 100 du nombre total des souches isolées	
Microflore totale	910	*Pseudomonas*	59,4
Actinomycètes	200	*Xanthomonas*	7,2
Champignons	1,1	*Acinetobacter* + *Moraxella*	7,1
Microflore utilisant les hydrocarbures du gas-oil	740	*Flavobacterium*	24,5
		Divers	1,4
Bactéries fixatrices d'azote	4,5	Total des bâtonnets Gram négatifs	89,6
Bactéries dénitrifiantes	0	Bactéries Gram positives	8,9
Bactéries sulfato-réductrices	0	Actinomycètes	1,5

3. 4. — *Étude de la microflore d'un sol pollué par une coupe légère vingt jours après la pollution*

Les résultats sont résumés dans le tableau 8. On trouve un très grand nombre de germes revivifiables (bactéries, Actinomycètes, champignons). Les bactéries utilisant les hydrocarbures du gas-oil représentent 81 p. 100 du total. Parmi les groupes fonctionnels, seules les bactéries fixatrices d'azote sont en grand nombre.

En ce qui concerne les genres présents, il y a un pourcentage considérable de bâtonnets Gram négatifs (89,6 p. 100 du nombre total des souches isolées), dont une très forte proportion appartient au genre *Pseudomonas* (59,4 p. 100). Parmi les souches isolées, un fort pourcentage (84,4 p. 100) sont capables d'utiliser le gas-oil.

Il est regrettable de ne pas avoir eu un sol identique non pollué pouvant servir de témoin, afin de comparer les résultats obtenus.

3. 5. — *Rôle des micro-organismes dans la restauration biologique des sols pollués par des hydrocarbures*

Malgré toutes les réserves faites concernant les prélèvements parvenus au laboratoire, dont on ne peut sous-estimer les difficultés dans le cas des pollutions accidentelles, on peut essayer d'expliquer le rôle des micro-organismes dans la restauration biologique des sols pollués par des hydrocarbures.

Au début, il y a une forte augmentation du nombre des micro-organismes utilisant les hydrocarbures. Ce sont surtout des bâtonnets Gram négatifs appartenant au genre *Pseudomonas*, résultat confirmant des observations récentes faites au laboratoire (ODIER, 1975 ; OUDOT, 1975). Ces bactéries utilisent l'azote du sol pollué. Puis on voit se développer des bactéries fixatrices d'azote (principalement aérobies) capables d'utiliser les hydrocarbures du gas-oil comme source de carbone et d'énergie. Dans le cas des bactéries aérobies, on a démontré qu'il s'agit d'un petit nombre de souches voisines spécialisées appartenant au genre *Arthrobacter*, déjà découvertes dans des biotopes riches en hydrocarbures (RIVIÈRE *et al.*, 1974).

La prolifération des souches aérobies dans un sol riche en substrat carboné, source d'électrons, établit des conditions favorables à la dénitrification et à la sulfato-réduction, ce qui explique la stimulation de ces groupes fonctionnels que l'on retrouve après la pollution, lorsque le sol n'est pas cultivé en luzerne.

Mais il y a des constituants du gas-oil qui sont difficilement métabolisables et qui persistent longtemps. C'est ce qui pourrait expliquer la stimulation tardive des Actinomycètes (tabl. 3), en particulier des souches du genre *Nocardia*, particulièrement aptes à la cooxydation (RAISBECK, 1971).

Dans un milieu à rapport $\frac{C}{N}$ élevé, les micro-organismes produisent des substances de réserve glucidiques, dont la biodégradation fait intervenir une microflore amylolytique, expliquant la stimulation observée de ce groupe fonctionnel. Un besoin élevé en azote et en oxygène est une des causes de la longue durée nécessaire à la biodégradation d'une telle pollution accidentelle, sauf si une culture de luzerne fournit l'azote nécessaire tout en favorisant par ses racines l'aération du sol (tabl. 7).

On peut retenir qu'une culture de luzerne stimule la microflore utilisant les hydrocarbures (tabl. 3) et favorise l'augmentation du pourcentage des bâtonnets Gram négatifs (fig. 3) parmi lesquels se trouvent les souches aptes à dégrader les hydrocarbures (OUDOT, 1975). De plus, elle supprime la stimulation de la sulfatoréduction et de la dénitrification, qui sont des modifications défavorables de l'équilibre microbien du sol. Il est regrettable que les prélèvements effectués dans un sol cultivé en luzerne n'aient pas été faits en même temps que ceux du même sol non cultivé. En effet, il n'est pas possible de savoir si une culture de luzerne stimule plus ou moins la microflore utilisant les hydrocarbures que ne le fait un sol pollué non cultivé.

CONCLUSIONS

Dans deux sols pollués accidentellement par des hydrocarbures, on note une évolution caractéristique de la microflore. Il y a une forte stimulation de la microflore totale et des Actinomycètes. Non seulement les micro-organismes utilisant le gas-oil comme source de carbone et d'énergie sont stimulés, mais aussi les fixateurs d'azote, les dénitrifiants et les sulfato-réducteurs. On observe une augmentation considérable du pourcentage des bâtonnets Gram négatifs. Ce sont des souches appartenant au genre *Pseudomonas* qui deviennent les plus nombreuses.

Quand le sol pollué est cultivé en luzerne, l'effet favorable sur la microflore utilisant les hydrocarbures se poursuit, et la disparition des hydrocarbures est plus rapide. En outre on n'observe plus de stimulation sur les microflores responsables de la sulfato-réduction et de la dénitrification.

Reçu pour publication en mars 1976.

REMERCIEMENTS

Ce travail a fait l'objet d'une Convention de Recherches passée entre l'Institut français du Pétrole et l'Institut national agronomique Paris-Grignon.

SUMMARY

EVOLUTION OF THE MICROFLORA IN A SOIL IMPREGNATED WITH HYDROCARBONS

This study concerned the evolution of the microflora in a soil polluted by an oil gas discharge. A lucern sowing was achieved on a part of the polluted area. The analyses revealed a slow evolution characterized by a important stimulation of the total microflora, the Actinomycetes and microflora utilizing hydrocarbons. Among the functional groups, the nitrogen fixing bacteria, the denitrifying bacteria and the sulphate-reducing bacteria are also stimulated. There is a considerable increase in the percentage of Gram negative rod bacteria which mainly belong to *Pseudomonas* genus. Strains of *Arthrobacter* genus seem to be responsible for nitrogen fixation. Lucern growing accelerates hydrocarbon biodegradation and removes the unfavourable effect of denitrification and sulphate reduction.

ZUSAMMENFASSUNG

MIKROFLORAENTWICKLUNG IN EINEM MIT KOHLENWASSERSTOFFEN GESÄTTIGTEN BODEN

Diese Untersuchung betrifft die Mikrofloraentwicklung in einem durch eine Gasölausschüttung verschmutzten Boden. Eine Luzernesaat wurde auf einen Teil der verschmutzten Bodenfläche durchgeführt. Die Analysen lassen eine langsame Entwicklung erkennen, die sich durch eine starke Stimulierung der gesamten Mikroflora, der Actinomyzeten und der die Kohlenwasserstoffen benutzenden Mikroflora ausdrückt. Unter den funktionellen Gruppen wurden die Stickstoffbindemittel, die Denitrifikationsmittel und die Sulfatreduktionsmittel auch stimuliert. Es entsteht auch eine wichtige Erhöhung des Prozentsatzes von Gram-negativen Stäbchen, die hauptsächlich zur *Pseudomonas*gattung gehören. Die Stämme der *Arthrobacter*gattung scheinen für die Stickstoffbindung verantwortlich zu sein. Der Luzerneanbau beschleunigt den biologischen Abbau der Kohlenwasserstoffen und beseitigt den ungünstigen Effeckt der Denitrifikation und der Sulfatreduktion.

РЕЗЮМЕ

Эволюция микрофлоры в почве пропитанной углеводородами.

Ж. РИВЬЕР, К. ГАТТЕЛЬЕ.

Изучалась эволюция микрофлоры в почве загрязненной разлитым на ней газ-ойлем. На части этой загрязненной почвы сеялась затем люцерна. Проведенные анализы доказывают что эволюция происходит медленно и что характеризуется она сильной стимуляцией общей микрофлоры, актиномицетов и микрофлоры углеводородной. Стимулируются также функциональные группы закрепляющие азот, денитрификаторы и группы восстанавливающие сульфат. Наблюдается сильное увеличение процента Грамм отрицательных палочек, принадлежащих, в частности, к роду Pseudomonas. Азот фиксируется как-будто штаммами рода Arthrobacter. Культура люцерны ускоряет биодеградацию углеводородов и снимает отрицательный эффект денитрификации и восстановлення сульфатов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANTONIEWSKI J., SCHAEFFER R., 1972. Recherches sur les réactions des coenose microbiennes de sols imprégnés par des hydrocarbures. Modification de l'activité respiratoire. *Ann. Inst. Past.*, **123**, 805-819.

BALANDREAU J., 1975. *Activité nitrogénasique dans la rhizosphère de quelques Graminées*. Thèse, Univ. Nancy.

BALL R. S., SELLERS W., 1966. Improved motility medium. *Appl. Microbiol.*, **14**, 670.

BOARD R. G., HOLDING A. J., 1960. The utilization of glucose by aerobic Gram-negative bacteria. *J. appl. Bact.*, **23**, XI.

BUCHANAN R. E., GIBBONS N. E., 1974. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology* 8e ed., Williams et Wilkins Cy., Baltimore.

DAVIES J. B., 1967. *Petroleum microbiology*. Elsevier éd. Amsterdam.

DAVIS C. E., NEWTON K. C., 1969. Numerical taxonomy of some named coryneform bacteria. *J. gen. Microbiol.*, **56**, 195-214.

DOBSON A. L., WILSON H. A., 1964. Respiration studies on soil treated with some hydrocarbons. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **28**, 536-541.

GATELLIER C., 1962. Importance du rôle des bactéries dans la corrosion du métal. *Bull. A.F.T.P.* n° 152.

GATELLIER C., GUDIU C., ROGIER Ph., 1974. Conséquences d'un déversement d'hydrocarbures dans le sol et techniques applicables à une réhabilitation. *XIIIe journée de l'hydraulique* (Paris).

GONTCHAROFF N., 1971. *Clé d'identification des bactéries hétérotrophes.* Dunod éd., Paris.

GUDIU C., SYRATT W. J., 1975. Biological aspects of land rehabilitation following hydrocarbon contamination. *Environ. Poll.*, **8**, 107-112.

HOLDING A. J., 1960. The properties and classification of the predominant Gram-negative bacteria occuring in soil. *J. appl. Bact.*, **23**, 515-525.

JOBSON A., MCLAUGHLIN M., COOK F. D., WESTLAKE D. W. S., 1974. Effect of amendments on the microbial utilization of oil applied to soil. *Appl. Microbiol.*, **27**, 166-171.

JONES J. G., KNIGHT M., BYROM J. A., 1970. Effect of gross pollution by kerosine hydrocarbons on the microflora of Moorland soil. *Nature.* London, **227**, 1166.

KAISER P., 1973. Hydrocarbures et écologie microbienne. *Petrolio e ambiente*, 23-51. Congrès Rome.

KALACEVIC-KRAJOVAN I., VRBASKI L., 1971. Contribution to the studies of microflora in oil-fields from Jermenovici. *Acta. Biol. Iugosl., Ser. Microbiol.*, **8**, 85-92.

KONOVALTSCHIKOFF-MAZOYER M., SENEZ J.-C., 1956. Dégradation bactérienne des hydrocarbures paraffiniques. *Ann. Inst. Pasteur*, **91**, 60-62.

ODIER E., 1975. *Attaque des carburants par les microorganismes dans les réservoirs.* Thèse, Univ. Paris VII.

OUDOT J., 1975. *Étude de la dégradation bactérienne des hydrocarbures.* Thèse, Univ. Dijon.

ODU C. I. I., 1972. Microbiology of soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *J. Inst. Petrol.*, **58**, 201-208.

POCHON J., TARDIEUX P., 1962. *Techniques d'analyse en Microbiologie du sol.* Éd. la Tourelle, Saint-Mandé.

PORTER J. N., WILHEM J. J., TRESNER H. D., 1960. Method for the preferentiel isolation of Actinomycetes. *Appl. Microbiol.*, **8**, 174.

RAISBECK J. M., 1971. *Some studies on the migration and microbial degradation of mineral oil in soil.* Thesis, Dept. Chem. Eng., Univ. Birmingham.

RIVIÈRE J., 1963. Rhizosphère et croissance du blé. *Ann. agron.*, **14**, 619-653.

RIVIÈRE J., FROUARD Y., CATROUX G., 1970. Influence d'enfouissements répétés de tiges de Maïs sur la microflore bactérienne des sols. *Ann. agron.*, **21**, 403-420.

RIVIÈRE J., OUDOT J., JONQUÈRES J., GATELLIER C., 1974. Fixation d'azote atmosphérique par des bactéries utilisant l'hexadécane comme source de carbone et d'énergie. *Ann. agron.*, **25**, 633-644.

SINGH-VERMA S. B., 1967. On the problem of quantitative estimation of micro-organisms in soil. *Biologie du Sol*, **7**, 14.

SOUMARE S., BLONDEAU R., 1972. Milieux pour l'étude de la microflore bactérienne du sol. *Ann. Inst. Pasteur*, **123**, 239-249.

TSUKAMURA M., 1966. Adansonian classification of Mycobacteria. *J. Gen. Microbiol.*, **45**, 253-273.

VERON M., GASSER F., 1963. Production d'hydrogène sulfuré par les Entérobactéries. *Ann. Inst. Pasteur*, **105**, 524.

Ann. agron., 1976, **27** (1), 101-109.

NOTE TECHNIQUE

UTILISATION DE LA TECHNIQUE DE STANFORD ET DEMENT POUR LE DOSAGE BIOLOGIQUE DES HERBICIDES DU SOL

G. SOULAS

Laboratoire de Microbiologie des sols,
Centre de Recherches de Dijon, I. N. R. A.,
21034 Dijon Cedex

RÉSUMÉ

Après avoir rappelé les objectifs liés à l'utilisation de dosages biologiques appliqués à la détermination des résidus d'herbicides, une technique de dosage dérivée de celle de STANFORD et DEMENT est décrite puis éprouvée. Les avantages qui découlent de son emploi sont discutés ainsi que son adaptation possible dans des études concernant les relations pesticides-sols.

INTRODUCTION

Un herbicide se présente dans le sol essentiellement sous deux états. Une première fraction de l'herbicide est immobilisée à la suite soit d'une recristallisation toujours possible, soit plus vraisemblablement d'une adsorption plus ou moins réversible sur les colloïdes du sol. Cette fraction a, pour partie et au moins temporairement, perdu son activité biologique. C'est par l'intermédiaire de la fraction solubilisée dans la solution du sol que s'exerce l'action herbicide souhaitée.

Aussi, dans la recherche des résidus d'herbicides dans le sol, l'utilisation du dosage biologique permet d'atteindre deux objectifs différents. Le premier est de déterminer la *fraction biologiquement active* d'un herbicide. Le résultat obtenu dépend des conditions de la mesure et ne reflète pas nécessairement la quantité totale d'herbicide actif

présent dans le sol étudié (BOUCHET, COUVREUR et DAGNEAUD, 1971 ; HANCE, HOCOMBE et HOLROYD, 1968). Il peut cependant guider dans le choix d'une culture de remplacement ou l'opportunité d'un nouveau traitement.

Le recours au dosage biologique peut également s'imposer lorsque, voulant évaluer la *quantité totale active ou non* d'un herbicide dans le sol, et partant, les risques à long terme, l'expérimentateur ne dispose que d'une méthode chimique imprécise ou nécessitant un appareillage sophistiqué ou encore trop longue pour lui permettre d'envisager un travail analytique de routine.

Il existe deux types principaux de méthodes biologiques de dosage des herbicides. Le premier met à profit la propriété qu'ont certains herbicides d'inhiber la photosynthèse et de réduire la croissance d'une population d'algues photosynthétiques (*Chlorelles, Chlamydomonas*) (PILLAY et TCHAN, 1972 ; TCHAN, ROSEBY et FUNNEL, 1975). L'avantage principal de cette méthode réside dans sa rapidité de réponse (3 jours) permettant une bonne appréciation de la fraction biologiquement active (en solution) du produit. Cependant, son principe et sa spécificité en limitent l'emploi aux urées substituées, aux uraciles et, à moindre degré, aux triazines.

Dans la seconde catégorie de méthodes nous trouvons celles qui utilisent des plantes supérieures comme organismes témoins. Ce sont celles qui ont trouvé le plus d'applications pratiques mais qui présentent aussi le plus de diversité. Cependant, même dans des conditions optimales et constantes de culture (enceintes climatisées), il existe certaines difficultés d'interprétation des résultats. Celles-ci sont liées au fait que la mesure n'est pas instantanée (20 à 30 jours) et que seule est accessible la résultante globale d'un ensemble de phénomènes physiques, chimiques ou biologiques se superposant dans le temps. En outre, la transposition du caractère mesuré (poids frais, matière sèche, longueur des feuilles des plantes témoins) en concentration de produit suppose la comparaison d'échantillons inconnus à des échantillons de référence dans lesquels l'adjonction de quantités connues de produit précède immédiatement le dosage. La question peut alors se poser de savoir si l'état d'évolution différent du produit dans les 2 types d'échantillons n'entache pas d'erreur cette comparaison.

Or TOMKINS, MCINTOSH et DUNIGAN (1968) ont par ailleurs proposé d'utiliser, dans l'étude des interactions herbicides-sols, une technique proche de celle mise au point par STANFORD et DEMENT (1957). Cette technique nous paraissait susceptible d'être adaptée au dosage biologique d'herbicides. La présente note a pour but de décrire cette technique, d'en déterminer les avantages éventuels et d'en prévoir des applications possibles.

MATÉRIEL — MÉTHODE

Les différentes expériences ont été réalisées avec de l'atrazine [1] (2-chloro, 4-éthylamino, 6-isopropylamino, 1-3-5, Triazine) (99,6 p. 100 de pureté) sur deux sols respectivement désignés : sol de Chevigny et sol S 15. Leurs principales caractéristiques sont données dans le tableau 1.

Ces sols ont été éventuellement dilués avec du sable d'Antibes lavé et tamisé à 0,2-1 mm. La plante témoin choisie a été l'avoine (*Avena sativa* var. *Selma*).

[1] Ce produit nous avait été gracieusement fourni par la Société Ciba-Geigy. Bâle.

TABLEAU I

Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés

Sol	pH (eau)	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	M.O. (%)	C.E.C. méq/100 g
Chevigny	7,2	4,4	48,4	30,1	10,0	33,9
S 15	7,0	11,2	70,9	17,9	5,1	19,1

Matériel

Les différents essais biologiques ont été réalisés à l'aide du dispositif représenté dans la figure 1. Certains des pots plastiques (70 × 70 × 60 mm) ont eu le fond enlevé (pots de semis), d'autres ont été fendus à la base de façon à leur adapter une mèche plate en coton, couvrant la totalité du fond du pot et émergeant de celui-ci de 7 à 8 cm environ.

Ces pots d'essais étaient ensuite disposés sur un support plastique usiné de façon à permettre aux mèches de tremper en permanence dans une solution nutritive contenue dans un réservoir sous-jacent muni d'un entonnoir permettant l'apport de solution nutritive fraîche.

La solution nutritive, dont la composition nous avait été fournie par la Station d'Agronomie de Dijon, contenait les composés suivants par litre de solution :

	(g)		(g)
KNO_3	0,2	$MnSO_4$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
$Ca(NO_3)_2$	0,5	$ZnSO_4$	$2 \cdot 10^{-3}$
K_2HPO_4	0,14	$CuSO_4$	$3 \cdot 10^{-4}$
$MgSO_4\ 7H_2O$	0,296	Na_2MoO_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$
NaCl	0,03	Fe sequestrène	10^{-2}
H_3BO_3	$2 \cdot 10^{-3}$		

Principe du dosage

On assure la germination de la plante témoin dans des pots sans fond (pots de semis) qui sont ensuite placés sur les pots d'essai contenant le produit à doser. La mise en œuvre du dosage comprend donc trois phases distinctes.

Préparation des pots de semis.

Dans un bac à fond plat, on place 20 pots sans fond recevant chacun 80 g de sable. On égalise la surface puis on tasse très légèrement. Sur le lit de semence ainsi préparé, on dispose 20 graines d'avoine par pot. On tasse à nouveau très légèrement puis on apporte 10 ml de solution nutritive. On recouvre les graines de 20 g de sable ; on tasse fortement, puis on apporte 5 ml de solution nutritive.

Dans le cas où la germination se fait sur sol, les graines sont réparties sur 70 g de sol puis recouvertes de 30 g de sol. Les deux arrosages sont alors respectivement de 30 ml et 10 ml. Le reste du protocole opératoire est identique.

Le bac contenant les 20 pots de semis ainsi préparés est recouvert de papier Kraft, puis placé en enceinte climatisée où règnent les conditions suivantes : 9 000 lux, 16 heures de jour (22°C ± 1) et 8 heures de nuit (19°C ± 1).

Deux jours après le semis, il est souvent nécessaire de retasser si l'on veut éviter que les graines sortent du sable. Dès le quatrième jour après le semis, les coléoptiles d'avoine étant visibles, on enlève le papier Kraft et on commence les arrosages journaliers (10 ml de solution nutritive). L'avoine atteint le stade plantule (7-8 cm) en 7 jours à partir du semis dans nos conditions d'expérience. C'est à ce stade que l'on réalise la transplantation. D'une façon générale, 20 pots de semis ont été préparés pour 15 pots d'essai.

Préparation des pots d'essai.

Le sol contenant l'atrazine à la concentration désirée est broyé, tamisé à 250 μ puis dilué au 1/20 soit avec du sable, soit avec du sol de même origine, tamisé à 1mm. On place 100 g de ce mélange dans les pots d'essai dont la mèche trempe déjà dans la solution nutritive.

Transplantation.

Les plantules des pots de semis présentant des signes de maladie ou un retard anormal de croissance sont éliminées afin d'avoir dans chaque pot une population végétale de 15 à 20 individus relativement homogène. Après quoi, les pots de semis, prélevés au hasard, sont placés sur les pots d'essai dans lesquels ils s'emboîtent. Le transfert se fait de façon à assembler les pots de semis contenant du sable et des pots d'essai contenant un mélange sol-sable. Les pots de semis et d'essai contenant uniquement du sol sont réunis entre eux.

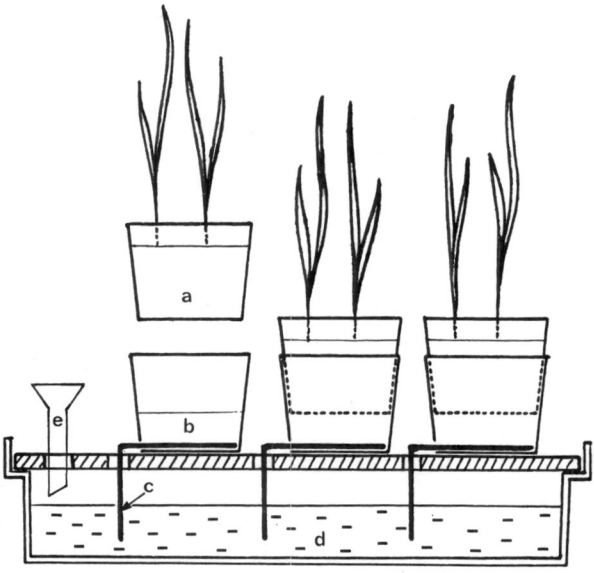


FIG. 1. — *Dispositif expérimental*

a : pot de semis ; *b* : pot d'essai ; *c* : mèche ; *d* : solution nutritive ; *e* : entonnoir

Les pots d'expérience ainsi reconstitués, réunis par séries de 15 (3 répétitions, 5 doses d'atrazine) ou 12 (3 répétitions, 4 doses), sont placés en enceinte climatisée pendant exactement 10 jours. On apporte régulièrement de la solution nutritive fraîche dans les réservoirs placés sous les pots.

Dix jours après la transplantation (17 après le semis), on coupe les plantes de chaque pot au niveau du sol, on les place dans une poche en papier ; le tout est porté à 105° pendant 3 jours à l'étuve. On détermine ensuite la matière sèche formée par pot puis par plante dans un pot.

ESSAIS RÉALISÉS

La première expérience consistait à éprouver la technique de dosage proposée. Le sol S 15 nous a servi de support pour cette étude. Cinq échantillons de ce sol ont reçu une quantité d'atrazine en solution dans l'acétone correspondant aux concentrations suivantes : 0,5-1,0-1,5-2,0-2,5 mg par kg de sol. Après évaporation de l'acétone et mélange, chacun de ces échantillons primaires a servi à la préparation de 3 échantillons secondaires obtenus par mélange de 5 g de sol à 95 g de sable. C'est

sur la base de ces 15 échantillons secondaires correspondant, par lot de 3, aux cinq concentrations suivantes : 0,025-0,050-0,075-0,100-0,125 mg d'atrazine par kg de mélange sol-sable, qu'a été réalisée l'étude statistique.

La deuxième expérience avait pour but d'apprécier l'effet de la dilution sur la signification du dosage. Pour cela, nous avons comparé les données expérimentales obtenues après application de la technique précédemment décrite à un mélange sol-sable (5/95, poids/poids), dans le domaine de concentration 0-0,1 p.p.m., à celles obtenues pour un sol non dilué, dans le domaine 0-0,5 p.p.m., où l'on peut valablement parler de résidus. Ce dernier type d'essai nous a semblé être un reflet sinon fidèle, du moins approché des techniques classiques de dosage biologique. Le sol de Chevigny a servi de support à cette étude. De par sa forte teneur en matières organiques, on pouvait attendre qu'il manifeste des propriétés d'adsorption vis-à-vis de l'atrazine.

RÉSULTATS

Les résultats de la première expérience sont rassemblés dans le tableau 2, leur analyse statistique dans le tableau 3. On peut voir que l'approximation de linéarité faite *a priori* dans le domaine d'étude retenu semble justifiée : le test F des écarts à la régression n'est pas significatif au seuil de 5 p. 100.

TABLEAU 2

Résultats sol S 15

Concentration dans sol p.p.m. (p/p)	0,5			1			1,5			2			2,5		
Concentration dans pot p.p.m. (p/p)	0,025			0,050			0,075			0,100			0,125		
MS/plante (mg)	36,1	45,3	44,6	35,7	37,7	37,1	27,5	27,5	18,4	29,3	18,4	16,3	12,7	18,9	18,1

TABLEAU 3

Analyse de variance sol S 15

Source de variation	S.C.E.	d.d.l.	C.M. S^2	E.T.S.	F
Variation totale	1 626,83	14			
Variation dose	1 459,90	4			
dont					
– Régression linéaire	1 388,56	1			
– Écarts à la régression	71,34	3	23,8		1,42 NS
Erreur	166,93	10	16,7	4,1	CV = 14,7 %

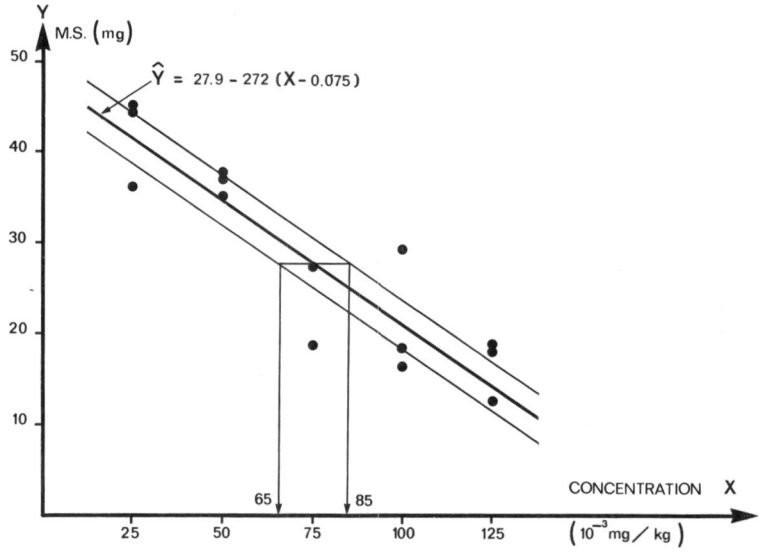


FIG. 2. — *Droite de régression de la matière sèche formée en fonction de la dose d'atrazine* (Sol S 15)
(● : moyenne de 3 répétitions)

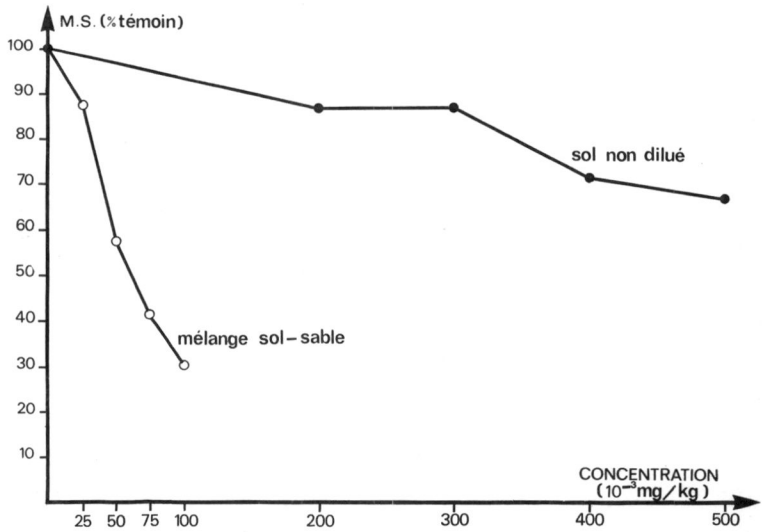


FIG. 3. — *Matière sèche formée en fonction de la dose d'atrazine* (Sol de Chevigny)
(●, ○ = moyennes de 3 répétitions)

La figure 2 donne la droite de régression de la matière sèche formée en fonction de la dose d'atrazine pour le sol S 15, ainsi que son équation. Les limites de confiance à 95 p. 100 encadrant cette droite de régression sont indiquées en traits fins ($t_{0,05}\ S_{\hat{y}} =$ 2,5 g). Elles nous ont servi à déterminer, par une résolution graphique également portée sur la figure 2, l'intervalle de confiance à 95 p. 100 relatif à la valeur moyenne de la concentration en herbicide d'un sol ($t_{0,05}\ S_{\hat{x}} = 0{,}01$) et pour une matière sèche donnée. En d'autres termes, l'erreur attachée à cette détermination atteint 13 p. 100 de la concentration médiane du domaine d'étude retenu.

Une étude statistique plus précise résultant de l'exploitation de 6 courbes étalon du même type a confirmé ces résultats.

La figure 3 donne des résultats de la deuxième expérience, exprimés en pourcentages par rapport aux témoins.

On constate une différence importante dans les variations de la quantité de matière sèche formée en fonction de la dose d'atrazine selon que le sol a été dilué ou non par du sable. Ainsi, dans la série avec dilution, la dose qui correspond à une réduction de croissance de 50 p. 100 par rapport à un témoin non traité (G.R. 50) est atteinte très rapidement (entre 0,025 et 0,050 p.p.m.) alors qu'elle se situe encore à l'extérieur du domaine exploré dans la seconde série malgré les plus fortes valeurs en atrazine testées.

DISCUSSION

La technique proposée ne semble pas fournir d'avantage décisif quant à la précision des résultats de mesure. L'erreur de 13 p. 100 affectant la mesure de la concentration moyenne en herbicide d'un sol inconnu est de l'ordre de grandeur de celles que l'on trouve dans la littérature.

Par contre, les avantages pratiques consécutifs à la mise en œuvre de cette technique sont intéressants. Ceux qui sont liés à la distinction entre pots de semis et pots d'essai ont déjà été soulignés par ailleurs (Tomkins, McIntosh et Dunigan, 1968) ; ils ont trait à la durée réduite du dosage (10 jours), à l'absence d'effet secondaire du produit étudié sur les graines en cours de germination et à la plus grande homogénéité des populations végétales à l'intérieur d'un même pot et entre les différents pots.

Les avantages liés à la dilution, donc propres à la technique ici proposée, sont de 2 ordres, techniques et méthodologiques.

En effet, l'utilisation d'un dosage biologique à des fins quantitatives suppose toujours la recherche préalable d'un domaine de réponse linéaire qui, dans le cas des herbicides, ne vaut que pour un couple plante-sol bien défini. Si l'un des partenaires du couple varie, la détermination d'un nouveau domaine d'étude s'impose. Or, la dilution du sol par du sable permet de mettre artificiellement une plus grande quantité d'atrazine en solution. Il en résulte un déplacement du domaine de réponse des plantes vers les faibles concentrations ainsi qu'il ressort de la figure 3. En appliquant cette technique à plusieurs sols variant par leur capacité d'adsorption, nous avons pu constater la faible variabilité du domaine de réponse toujours compris, dans nos conditions expérimentales, entre 0,025 et 0,150 mg d'atrazine par kilogramme de

mélange sol-sable dans les pots d'essai. Ainsi, en minimisant le rôle d'adsorbant joué par le sol, la dilution peut permettre, pour un produit donné, de stabiliser le domaine de réponse, cela quel que soit le type de sol utilisé lors du dosage.

Une limitation, liée au système d'arrosage adopté, apparaît cependant dans l'utilisation qui pourrait être faite de la méthode pour des produits solubles à coefficient de diffusion élevé. Dans ce cas en effet, on pourrait envisager une contamination mutuelle des échantillons par l'intermédiaire de la solution nutritive commune. Cependant la distance séparant deux échantillons de sol semble suffisamment grande par rapport à la distance moyenne de diffusion de tels composés. Cette constatation, ajoutée à celle de l'existence d'un flux de convection lié à l'évapotranspiration nous permet de supposer que l'objection précédente n'est pas opposable à l'emploi de cette technique pour de tels produits.

Pour des recherches plus fines, certaines améliorations pourraient être apportées. On sait en effet que la réponse d'un organisme à un stimulus est généralement proportionnelle au logarithme de l'intensité de ce stimulus. Ainsi, le choix comme variable explicative, dans une étude de régression, du logarithme de la dose d'herbicide, donnerait une relation fonctionnelle plus adaptée et permettrait non seulement une extension du domaine d'étude mais aussi une meilleure précision des résultats et donc une meilleure prévision.

Enfin, le dernier intérêt est d'ordre méthodologique. La variation du taux de dilution d'un sol a pour effet de modifier le rapport quantité de produit/quantité de sol et de provoquer une déformation des courbes de réponse des plantes consécutive à une remise en solution du produit d'autant plus importante que la dilution est forte. Il semble qu'il y aurait là, en faisant l'hypothèse d'un état physiologique comparable des plantes d'un type de support à l'autre, un moyen d'étudier par voie biologique les propriétés d'adsorption d'un sol maintenu à des états d'hydratation proches de la réalité agronomique.

Ainsi, les principaux avantages liés à l'utilisation de la technique de dosage décrite dans la présente note en font un instrument de travail intéressant dont on pourrait envisager les possibilités d'emploi dans un travail analytique de routine ainsi que dans des études concernant les relations pesticides-sols.

Reçu pour publication en mars 1976.

SUMMARY

BIOASSAY OF SOIL HERBICIDES THROUGH THE STANFORD' AND DEMENT'S TECHNIQUE

The aims connected with the use of bioassays to determine herbicide residues are first recalled and a determination technique related with that of Stanford and Dement is described and tested. The advantages due to the use of this technique are discussed as well as its possible adaptation to studies on soil-pesticide relationships.

ZUSAMMENFASSUNG

ANWENDUNG DER STANDFORDSCHEN UND DEMENTSCHEN TECHNIK AUF DEN BODENHERBIZIDENBIOTEST

Die Zwecke, die mit der Anwendung von Biotesten auf die Erfassung der Herbizidenürckstände verbunden sind, werden zusammengefasst und eine Bestimmungstechnik gemäss der Standfordschen und Dementschen Technik wird beschrieben und erprobt. Die Vorteile, die aus ihrer Anwendung hervorgehen, sowie ihre mögliche Anpassung an Untersuchungen der Böden-Pestiziden Beziehungen werden erläutert.

РЕЗЮМЕ

Техническая заметка. Применение технологии Станфорда и Демента при биологической дозировке гербицидов в почве.

Г. СУЛА.

Прежде всего напоминается о целях применения биологических дозировок при определении остаточных количеств гербицидов; затем описывается и испытывается технология этих дозировок, представляющая измененный метод Станфорда и Демента. И, наконец, обсуждаются преимущества этой технологии, и возможности ее применения при изучении взаимоотношений пестициды — почвы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUCHET F., COUVREUR F., DAGNEAUD J.-P., 1971. Recherche de résidus de Triazines dans le sol; influence des techniques de prélèvement et de conservation des échantillons. *Compte rendu des journées d'études sur les herbicides. VIe Conférence du Columa*, tome 1, 56-65.

HANCE R. J., HOCOMBE S. D., HOLROYD J., 1968. The phytotoxicity of some herbicides in field and pot experiments in relation to soil properties. *Weed Res.*, **8**, 136-144.

PILLAY A. R., TCHAN Y. T., 1972. Study of soil algae VII. Adsorption of herbicides in soil and prediction of their rate of application by algal methods. *Plant and Soil*, **35**, 571-594.

STANFORD G., DEMENT J. D., 1957. A method for measuring short term nutrient absorption by plants. I. Phosphorus. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 612-617.

TCHAN Y. T., Joan E., ROSEBY, FUNNEL G. R., 1975. A new rapid specific bioassay method for photosynthesis inhibiting herbicides. *Soil Biol. Biochem.*, **7**, 39-44.

TOMKINS G. A., MCINTOSH J. H., DUNIGAN E. P., 1968. Use of the Stanford Dement bioassay to study Atrazine-soil reactions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32**, 273-277.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Agronomie.

Le Directeur de la publication : M.-L. Cagnac

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 9-1976

Dépôt légal : 3e trimestre 1976. N° d'impression : 1224

CPPAP n° 26017

annales agronomiques

Bimestriel

1976

Vol. 27 . N° 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1976, **27** (2), 111-140.

PRÉSENTATION D'UNE ÉTUDE ANALYTIQUE DE L'ADVECTION

I. — Advection liée aux variations horizontales de concentration et de température

B. ITIER et A. PERRIER

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Nous présentons une étude de l'advection, c'est-à-dire des variations longitudinales des facteurs microclimatiques (température, humidité, ...) et des flux (chaleur, évaporation, ...) consécutives à une brusque variation des caractéristiques de surface (température, humidité, ...) entre une zone amont homogène et une zone aval, à l'exclusion de toute variation de la rugosité.

La solution de type analytique retenue donne des résultats très voisins de ceux obtenus numériquement par Taylor (1970 et 1971) pour les deux cas habituellement étudiés : concentration constante au sol et flux de surface constant.

Elle permet de plus d'obtenir une solution pour le cas d'une humidité constante en surface, donnant la loi d'évolution de la température de surface et l'évolution simultanée des flux de chaleur sensible et latente. On montre qu'une advection due à un changement d'humidité revient pratiquement à une advection à concentration surfacique constante pour les deux flux pris indépendamment et à une advection à flux d'enthalpie constant pour leur somme (fig. 10 et 11).

L'écart de flux entre les zones aval et amont varie approximativement selon une loi en $x^{-0,15}$ et le flux moyen d'une zone O-X est voisin de celui mesuré à l'abscisse $\frac{3X}{10}$ sous le vent.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le déplacement et l'agitation des masses d'air au-dessus d'une surface entraînent des échanges turbulents de chaleur et de masse telle que la vapeur d'eau (évaporation) ou le gaz carbonique (résultant de la photosynthèse) ; les mouvements de cette masse d'air sont d'autre part, eux-mêmes liés de façon prépondérante aux mécanismes de transfert de quantité de mouvement.

Il est admis qu'en zone homogène et vaste, s'établit un certain équilibre qui

conduit à une invariabilité des caractéristiques de la masse d'air pour chaque niveau de côte z et quelle que soit l'abscisse considérée. Ainsi, les profils de température de masse d'air $T(z)$, de concentration en vapeur d'eau $C(z)$ et de vitesse $U(z)$ restent constants selon x. Selon ce schéma, les flux de quantité de chaleur, de masse ou de quantité de mouvement se propagent uniquement selon la verticale, sans contribuer à faire varier les caractéristiques des basses couches de l'air au cours de leur déplacement horizontal. Ce schéma est celui qui est le plus généralement admis pour l'analyse des situations agronomiques et l'on dit alors se trouver dans l'hypothèse de la conservativité des flux verticaux.

L'advection conduit au contraire à la modification, aussi minime soit-elle, des caractéristiques de la masse d'air au cours de son déplacement, les flux n'étant jamais parfaitement conservatifs. La variation verticale de ces flux, presque nulle au-dessus d'une vaste zone homogène (BOUCHET et PERRIER, 1973) est très rapide au voisinage d'une discontinuité.

En agronomie, où le parcellaire tend à juxtaposer des cultures de type et de stade phénologique très variés, la possibilité de discontinuité nette entre champs est fréquente et l'advection d'un effet probablement non négligeable. L'irrigation sélective tend de plus à créer des zones de forte discontinuité d'humidité de surface, même entre des cultures d'un même type.

A la suite des travaux publiés par un certain nombre d'auteurs (PHILIP, 1958 ; TAYLOR, 1970-1971 ; WEISMAN, 1975), notre but est de jeter ici les bases d'une solution de type analytique de ce phénomène d'advection. En effet, ce type d'approche permet plus facilement la généralisation des résultats et offre évidemment la possibilité d'utiliser les fonctions intermédiaires obtenues au cours du calcul à l'étude de tout phénomène lié à l'advection.

I. — ADVECTION LIÉE AUX VARIATIONS HORIZONTALES DE CONCENTRATION ET TEMPÉRATURE

LISTE DES SYMBOLES

A : Caractérise la zone amont
a : albédo
C : Concentration
Cp : Chaleur massique de l'air
$f(z, H)$ ou $f(z/H)$: fonction
$F(H/z_0)$ ou $F(x/z_0)$: fonction
$g(z, x)$: fonction
$G(z/z_0, H/z_0)$: fonction
$H(x)$: épaisseur de la couche limite
$h(x)$, $h'(x)$, $h''(x)$: sous-couches limites
$I(H)$: fonction
$K(z)$: diffusivité turbulente
k : constante de Von Karman (0,4)
L : chaleur latente de vaporisation de l'eau
M : Masse molaire de l'eau

n : exposant
P(T) : pression de vapeur saturante de H_{20}
P : pression de vapeur H_{20} ($P = \frac{RT}{M} C_{H\,20}$)
R : constante des gaz parfaits
Rg : Rayonnement global
Rn : Rayonnement net
T : température de l'air
Te : température équivalente ($Te = T + \frac{P)}{\gamma}$
U(z) : vitesse du vent
u_* : vitesse de frottement (W)
x : distance au bord d'attaque (sous le vent)
z : hauteur
z_0 : paramètre de rugosité $[z_0] = L$
α : coefficient
β : coefficient relatif à l'humidité $\beta = \frac{P}{P(T)}$
γ : constante psychrométrique ($\rho C p / \frac{LM)}{RT}$
δ : erreur
Δ : différence entre deux zones
ε : émissivité
ρ : masse volumique de l'air
ν : rapport z/z_0
η : rapport z_0/H
ψ : rapport $(z + z_0)/H$
σ : constante de Boltzmann ($5{,}67\ 10^{-8}$)
φ : flux dans l'air
φ_c : flux de conduction dans le sol

La solution générale du problème réel, où toutes les grandeurs peuvent varier en même temps, est contenu dans l'ensemble des équations de Navier et Stockes, auxquelles on doit ajouter l'équation de continuité et celle du bilan d'énergie. Mais une solution générale de ce type ne peut être analysée que de façon numérique et son champ d'application serait alors trop restreint car lié aux conditions particulières introduites. Une telle solution ne permettrait pas d'obtenir les conclusions de type général que nous souhaitons.

On a donc recherché à simplifier le problème en choisissant la direction principale d'analyse (axe des x) dans le sens du vent et en supposant les échanges latéraux négligeables (problème bidirectionnel), et en se plaçant, dans un premier temps, en régime permanent.

Précisons qu'il ne sera présenté ici qu'une étude limitée au changement de concentration de surface, prise au sens large, qu'il s'agisse de la chaleur ($C = \rho C p T$), de la vapeur d'eau ($C = MP/RT$) ou de la concentration C de tout autre gaz ou polluant. Les cas où un changement de rugosité (z_0) intervient, soit seul, soit couplé au changement de concentration feront l'objet de publications ultérieures.

De plus, les gaz ou polluants seront traités comme passifs ; on n'envisagera donc pas le cas où le coefficient d'échange turbulent dépendrait du profil de concentration et en particuller de la stabilité thermique (TAYLOR, 1970 et 1971 ; WEISMAN, 1975).

1. — *Approche physique*

A. La figure 1 décrit le cas où un changement d'état de surface se produit sans changement de rugosité et de vitesse du vent.

On considère schématiquement deux zones :

a) une zone amont, où nous supposerons pour l'instant que toutes les caractéristiques de l'air sont parfaitement établies et ne dépendent donc que de la hauteur z mais pas de l'abscisse x.

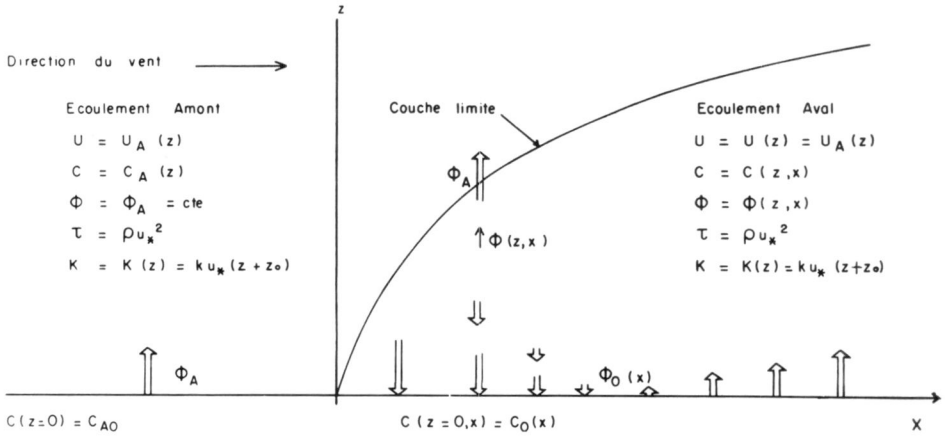


FIG. 1. — *Schéma descriptif des conditions aux limites dans le cas de l'advection avec changement de concentration de surface*

Elles sont définies par :

— un profil amont de vitesse du vent $U(z,x) = U(z)$;
— un profil amont de diffusivité turbulente $K(z,x) = K(z)$;
— un profil amont de concentration :

1. soit de chaleur :

$$C_{1A}(z, x) = [\rho C p T_A](z, x) \sim \rho C p T_A(z, x) = \rho C p T_A(z)$$

2. soit de vapeur d'eau :

$$C_{2A}(z, x) = C_{2A}(z) = \frac{M}{RT} P_A(z)$$

3. soit d'enthalpie utilisable, regroupant les deux concentrations précédentes (PERRIER, 1975) :

$$C_{3A}(z, x) = C_{3A}(z) = \rho C p\left(T_A(z) + \frac{P_A}{\gamma}(z)\right) = \rho C p T e_A(z)$$

4. soit de tout autre gaz ou polluant :

$$C_{4A}(z, x) = C_{4A}(z)$$

— quant aux flux amont relatifs à toutes les concentrations précitées, ils s'écriront :

$$\varphi_A(z, x) = \varphi_A(z) = \text{Cte}$$

b) une zone aval, où ces mêmes paramètres seront fonction de z et de x (x étant l'abscisse comptée à partir de la discontinuité de surface dans la direction du vent, la zone aval sera donc caractérisée par des profils dépendant de z et x pour :

— la chaleur : $C_1(z, x) = (\rho C p T)(z, x) \simeq \rho C p T(z, x)$,

— la concentration en vapeur d'eau : $C_2(z, x) = \dfrac{M}{RT} P_{H_2O}(z, x)$,

— l'enthalpie utilisable : $C_3(z, x) = (\rho C p T e)(z, x) = \rho C p \left\{T(z, x) + \dfrac{P}{\gamma}(z, x)\right\}$,

— les flux relatifs à chacune de ces quantités : flux de chaleur sensible $\varphi_1(z, x)$, flux de vapeur d'eau $\varphi_2(z, x)$ et flux d'enthalpie $\varphi_3(z, x)$ qui est la somme du flux de chaleur sensible et du flux de chaleur latente.

Les profils de vitesse du vent $U(z)$ et de diffusivité turbulente $K(z)$ seront supposés indépendants de x et les mêmes qu'en zone amont.

Le problème à résoudre est alors le suivant : connaissant les profils de concentrations et les flux en zone amont, comment obtenir leur évolution en zone aval ? c'est-à-dire : $C_A(z)$ et φ_A étant connus, comment évoluent $C(z, x)$ et $\varphi(z, x)$?

B. *Équations de base.*

Pour la résolution, on utilisera les deux équations classiques suivantes :

a) *la liaison entre le flux et la concentration* :

$$\varphi(z, x) = K(z) \frac{\partial}{\partial z} C(z, x) \tag{1}$$

Par convention, nous écrirons qu'un flux est positif lorsqu'il représente un gain pour la surface (convention du bilan d'énergie) ;

b) *l'équation de conservation* :

$$U(z) \frac{\partial}{\partial x} C(z, x) = \frac{\partial}{\partial z} \varphi(z, x) \tag{2}$$

On fera également intervenir, pour l'étude de l'évolution des concentrations de surface, l'équation du bilan d'énergie :

$$R_n(x) + \varphi_c(x) + \varphi_1(x) + L \cdot \varphi_2(x) = 0 \tag{3}$$

ou

$$R_n(x) + \varphi_c(x) + \varphi_3(x) = 0 \tag{3b}$$

On supposera d'autre part, comme dans tout problème d'échanges turbulents, que l'état de surface de la zone aval influence les caractéristiques de l'air jusqu'à une hauteur $H(x)$. Cette hauteur, pour l'instant inconnue, mais dont on peut supposer qu'elle est une fonction univoque, monotone et croissante de l'abscisse x, correspond

au sommet de la couche limite de diffusion. Par définition, cette « couche limite » sera telle qu'à l'abscisse x, pour toute hauteur $z > \mathrm{H}(x)$, les grandeurs considérées, C et φ, n'ont pas encore été modifiées par rapport à la zone amont :

$$\mathrm{C}(z \geqslant \mathrm{H}(x), x) = \mathrm{C}_{\mathrm{A}}(z) \tag{4a}$$
$$\varphi(z \geqslant \mathrm{H}(x), x) = \varphi_{\mathrm{A}} \tag{4b}$$

Les flux passent de la valeur amont pour $z = \mathrm{H}(x)$ à la valeur au sol $\varphi_0(x)$. Celle-ci est l'une des inconnues majeures du système. Pour ce qui est des concentrations, elles varient de la valeur qui règne en zone amont au niveau $z = \mathrm{H}(x)$ à la valeur au sol $\mathrm{C}_0(x)$ qui peut dans certains cas être elle aussi inconnue.

C. *Étude de la solution générale proposée.*

Définissons tout d'abord les quantités suivantes :

$$\Delta\varphi(z, x) = \varphi(z, x) - \varphi_{\mathrm{A}}(z) = \varphi(z, x) - \varphi_{\mathrm{A}}$$

et

$$\Delta\mathrm{C}(z, x) = \mathrm{C}(z, x) - \mathrm{C}_{\mathrm{A}}(z)$$

Pour $z = 0$ nous écrirons :

$$\Delta\varphi(o, x) = \Delta\varphi_0(x) = \varphi(0, x) - \varphi_{\mathrm{A}}$$
$$\Delta\mathrm{C}(0, x) = \Delta\mathrm{C}_0(x) = \mathrm{C}(0, x) - \mathrm{C}_{\mathrm{A}}(z = 0)$$

Introduisons une fonction $g(z, x)$ qui traduira la variation verticale sous forme adimensionnelle, du flux à l'intérieur de la couche limite :

$$g(z, x) = \frac{\Delta\varphi(z, x)}{\Delta\varphi_0(x)} \tag{5a}$$

Puisque $\mathrm{H}(x)$ est supposé être une fonction univoque de x, on peut écrire indifféremment $g(z, x)$ ou $f[z, \mathrm{H}(x)]$, les deux fonctions ayant la même valeur pour une abscisse x donnée :

$$g(z, x) = f(z, \mathrm{H}(x)) = f(x, \mathrm{H}) \qquad \forall z \text{ et } x \tag{5b}$$

Introduisons à présent la fonction $\mathrm{Y}(z, \mathrm{H})$ et sa valeur particulière $\mathrm{I}(\mathrm{H}) = \mathrm{Y}(z = \mathrm{H}, \mathrm{H})$:

$$\mathrm{Y}(z, \mathrm{H}) = \int_0^z \frac{f(z, \mathrm{H})}{\mathrm{K}(z)}\, \mathrm{d}z \tag{6a}$$

$$\mathrm{I}(\mathrm{H}) = \int_0^{\mathrm{H}} \frac{f(z, \mathrm{H})}{\mathrm{K}(z)}\, \mathrm{d}z \tag{6b}$$

On peut alors obtenir à partir de la relation (1) intégrée, compte tenu des conditions aux limites au sommet de la couche limite 4*a* et 4*b* (cf. annexes 1 et 2) :

$$\frac{\Delta\varphi_0(x)}{\Delta\mathrm{C}_0(x)} = -\frac{1}{\mathrm{I}(\mathrm{H})} \tag{7}$$

$$\frac{\Delta\mathrm{C}(z, x)}{\Delta\mathrm{C}_0(x)} = \left(1 - \frac{\mathrm{Y}(z, \mathrm{H})}{\mathrm{I}(\mathrm{H})}\right) \tag{8}$$

En dehors de la connaissance de $\mathrm{K}(z)$ et de $g(z, x)$ ou $f(z, \mathrm{H})$ (cf. paragraphe suivant : solution particulière), la résolution des équations (7) et (8) n'impose que la

connaissance de $H(x)$. Cette hauteur est obtenue (cf. annexe 3) au moyen de l'intégration entre les bornes O et $H(x)$ de l'équation de conservation (2) modifiée par le changement de $\frac{\partial}{\partial x}$ par $\frac{dH}{dx} \cdot \frac{\partial}{\partial H}$ [$H(x)$ étant supposé être une fonction continue et monotone de x].

On obtient alors :

$$\frac{dH}{dx}(x) = \frac{-\Delta\varphi_0(x)}{\int_0^H U(z) \frac{\partial}{\partial H}(\Delta C(z, x))\, dz} \tag{9}$$

Compte tenu des relations (7) et (8), cette relation peut aussi s'écrire :

$$\frac{dH}{dx}(x) = \left\{\frac{I(H)}{\Delta C_0(x)} \int_0^H U(z) \frac{\partial}{\partial H}\left[\Delta C_0(x)\left(1 - \frac{Y(z, H)}{I(H)}\right)\right] dz\right\}^{-1} \tag{9 b}$$

ou

$$\frac{dH}{dx}(x) = \left\{\frac{1}{\Delta\varphi_0(x)} \int_0^H U(z) \frac{\partial}{\partial H}\left[\Delta\varphi_0(x)\left(I(H) - Y(z, x)\right)\right] dz\right\}^{-1} \tag{9 c}$$

A partir de cet ensemble de relations, on a considéré trois cas particuliers dépendant des conditions de surface imposées en zone aval et résolu, dans chacun de ces cas, les trois questions posées : évolution de la « couche limite », des flux et des concentrations :

a) *Cas d'une concentration au sol fixée* : $Co(x) = Co$.

Les équations 7, 8 et 9 *b* deviennent alors :

$$\frac{dH}{dx}(x) = \left\{I(H) \int_0^H U(z) \frac{\partial}{\partial H}\left(1 - \frac{Y(z, H)}{I(H)}\right) dz\right\} \tag{10}$$

$$\Delta\varphi_0(x) = -\frac{\Delta C_0}{I(H)} \tag{11}$$

et

$$\Delta\varphi(z, x) = -f(z, H)\frac{\Delta C_0}{I(H)} \tag{11 b}$$

$$\Delta C(z, x) = \Delta C_0\left(1 - \frac{Y(z, H)}{I(H)}\right) \tag{12}$$

b) *Cas d'un flux imposé à la surface du sol* $\Delta\varphi_0(x) = \Delta\varphi_0$.

Les équations 7, 8 et 9 *c* deviennent :

$$\frac{dH}{dx}(x) = \left\{\int_0^H U(z) \frac{\partial}{\partial H}\left(I(H) - Y(z, H)\right) dz\right\}^{-1} \tag{13}$$

$$\Delta\varphi(z, x) = \Delta\varphi_0 f(z, H)$$

$$\Delta C_0(x) = -\Delta\varphi_0 I(H) \tag{14}$$

$$\Delta C(z, x) = -\Delta\varphi_0\left(I(H) - Y(z, H)\right) \tag{15}$$

c) *Cas d'une évolution connue de la concentration de surface.*

Ce cas sera, par exemple, celui de la concentration d'enthalpie lorsqu'il y aura un changement d'humidité entre la zone amont et la zone aval. En effet, compte tenu des équations 7 et 3 *b* :

$$\Delta C_{3o}(x) = -\,I(H)\,\Delta\varphi_{3o}(x) = I(H)\left(Rn(x) + \Delta\varphi c(_x)\right) \qquad (16\ a)$$

Négligeons l'énergie échangée par conduction avec le sol $\Delta\varphi_c(x)$ et exprimons la variation de l'écart de flux enthalpique au sol $\Delta\varphi_3(x)$ en fonction de l'écart d'albédo, du rayonnement global et de la variation de température de surface :

$$\Delta\varphi_{3o}(x) = \Delta Rn(x) = Rg\Delta a + 4\varepsilon\sigma T^3\Delta To(x) \qquad (16\ b)$$

C_3 et T sont reliés à travers un paramètre de liaison de l'eau tel que :

$$C_3 = \rho Cp\left(T + \frac{PH20}{\gamma}\right) = \rho Cp\left(T + \frac{\beta P(T)}{\gamma}\right) \qquad (16\ c)$$

Compte tenu des équations 16 *a*, 16 *b* et 16 *c* on pourra donc déterminer l'évolution de $T_0(x)$:

$$T_0(x) + \frac{1}{\rho Cp + 4\varepsilon\sigma T^3\,I(H)} \cdot \beta\,\frac{LM}{RT} \cdot P(T_o(x)) =$$
$$T_{0A} + \frac{1}{\rho Cp + 4\varepsilon\sigma T^3\,I(H)}\left\{\beta_A\,\frac{LM}{RT}\,P(T_{oA} - \Delta aRg\,I(H)\right\} \qquad (16\ d)$$

L'équation 9 pourra alors s'écrire :

$$\frac{dH}{dx}(x) = \left\{ I(H)\int_o^H U(z)\,\frac{\partial}{\partial H}\left(1 - \frac{Y(z, H)}{I(H)}\right)dz + \frac{\frac{\partial}{\partial H}(\Delta C_0(x))}{\Delta C_0(x)}\int_o^H U(z)\left(I(H) - Y(z, H\right)dz\right\}^{-1} \qquad (17\ a)$$

ou dans le cas ou $Rg\Delta a = 0$, puisque $\Delta\varphi_o(x) \propto \Delta T_o(x)$, l'équation 9 ter deviendra :

$$\frac{dH}{dx}(x) = \left\{ \int_o^H U(z)\,\frac{\partial}{\partial H}\left(I(H) - Y(z, H)\right)dz + \frac{\frac{\partial}{\partial H}(\Delta T_0(x))}{\Delta T_0(x)}\int_o^H U(z)\left(I(H) - Y(z, H)\right)dz\right\}^{-1} \qquad (17\ b)$$

Contrairement aux deux cas précédents, il n'y aura pas de loi générale d'évolution de H en fonction de x, celle-ci dépendant chaque fois de T_{0A}, $\Delta\beta$ et ΔaRg.

Dans chacun de ces trois cas particuliers, à partir des profils de vitesse de vent $U(z)$ et de diffusivité turbulente $K(z)$, et à condition de connaître la « fonction d'extinction de l'écart de flux » $f(z, H)$, il est possible de répondre aux trois questions posées :

— Variation des flux en fonction de la distance au bord d'attaque (équations 7 et 11).

— Évolution des concentrations (équations 7, 14 et 16 d'une part et 8, 12 et 15 d'autre part).
— Évolution de la hauteur de la « couche limite de diffusion » (équations 9, 9 *b*, 9 *c*, 10, 13, 17 *a*, 17 *b*).

Pour y parvenir et justifier plus précisément le choix de cette méthode par rapport à une solution purement numérique des équations de base, il est cependant nécessaire d'obtenir des solutions analytiques à ces équations.

2. — DESCRIPTION ET ANALYSE DE LA SOLUTION PARTICULIÈRE ADOPTÉE

Pour obtenir la fonction $f(z, \mathrm{H}(x))$, nous avons adopté la technique de Von Karman-Polhausen qui consiste à choisir le polynôme de rang le moins élevé qui satisfasse toutes les conditions aux limites du système. Les équations 7, 8 et 9 dépendant étroitement de la forme de $f(z, \mathrm{H}(x))$, il faut donc être très prudent dans le choix des conditions aux limites qui conditionnent fortement la solution de cette fonction.

Les conditions aux limites sont :

— au niveau $z = \mathrm{H}(x)$

1° égalité des flux amont-aval (relation 4 *b*)

$$f(z = \mathrm{H}, \mathrm{H}) = f(\mathrm{H}, \mathrm{H}) = 0$$

2° même variation verticale des flux

$$\frac{\partial}{\partial z} f(\mathrm{H}, \mathrm{H}) = 0$$

3° même tendance à la variation verticale des flux

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} f(\mathrm{H}, \mathrm{H}) = 0$$

— au niveau de la surface $z = 0$

4° par définition :

$$f(z = 0, \mathrm{H}) = f(0, \mathrm{H}) = 1$$

5° conservation verticale des flux à la surface (application de l'équation de conservation $\mathrm{U}(z = 0) = 0$)

$$\frac{\partial}{\partial z} f(0, \mathrm{H}) = 0$$

A notre avis, et il en serait autrement dans le cas de l'étude de l'influence d'un changement de rugosité (cf. Taylor 1969, éq. n° 4), rien n'autorise à écrire que :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} f(0, \mathrm{H}) = 0$$

A partir de ces conditions, aux limites, on peut déterminer les coefficients du polynôme suivant :

$$f(z, \mathrm{H}) = a(\mathrm{H})\, z^4 + \mathrm{b}(\mathrm{H})\, z^3 + c(\mathrm{H})\, z^2 + d(\mathrm{H})\, z + e$$

et on obtient, avec $\nu = z/\mathrm{H}$:

$$f(z, \mathrm{H}) = f(z/\mathrm{H}) = -3\,\nu^4 + 8\,\nu^3 - 6\,\nu^2 + 1 \tag{18}$$

(l'utilisation de la variable $\nu = z/\mathrm{H}$, s'explique par le fait que les conditions aux limites sont indépendantes de l'abscisse x donc de H) (fig. 2).

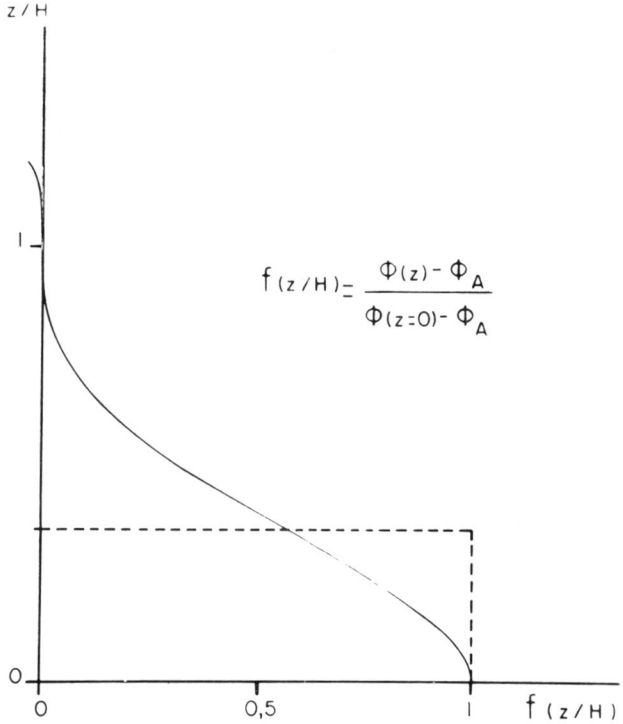


FIG. 2. — *Évolution en fonction de la hauteur au sein de la couche limite de l'écart relatif de flux entre les zones aval et amont. La courbe en tiretet représente le schéma de variation adopté par* ELLIOT (1958).

En choisissant pour cette étude la forme la plus généralement admise de variation verticale de vitesse du vent et de diffusivité turbulente (SUTTON, 1952 ; LAIKHTMAN, 1961 ; LUMLEY et PANOFSKY, 1964 ; PLATE, 1972) :

$$\mathrm{U}(z) = \frac{u_*}{k} \log \frac{z + zo}{zo} \tag{19}$$

$$\mathrm{K}(z) = k u_* \,(z + zo) \tag{20}$$

on arrive à effectuer l'intégration des relations 7 à 17 *b*. Seule la valeur de $\mathrm{H}(x)$ ne peut être obtenue que par intégration numérique de $\frac{\mathrm{dH}}{\mathrm{d}x}$. L'annexe 4 présente les expressions analytiques complètes des fonctions générales I et Y qui interviennent dans les relations 7, 8 et 9, servant de base au calcul de toutes les autres expressions, et que nous appellerons F et G pour le cas particulier choisi :

$$F(H/zo) = ku_* \, I(H) = \int_o^H \frac{f(z/H)\, dz}{z + zo} \tag{21}$$

$$G(z/zo, H/zo) = ku_* \, Y(z, H) = \int_o^z \frac{f(z, H)}{z + zo}\, dz \tag{22}$$

3. — RÉSULTATS ET COMPARAISONS AVEC D'AUTRES MODÈLES

Les résultats et comparaisons portent sur trois paramètres : la hauteur de la « couche limite » de diffusion développée en aval de la discontinuité de surface et l'évolution en fonction de la hauteur et de la distance du bord d'attaque des *flux* et des *concentrations*.

A. — *Quelques résultats*

Avant d'en arriver à la présentation de quantités adimensionnées, plus générales, mais souvent moins parlantes de prime abord, un exemple en vraie grandeur sera présenté pour illustrer les résultats essentiels de cette étude. Les figures 3, 4 et 5 sont relatives à une zone de rugosité homogène d'environ 1 cm (cas d'une prairie, d'un sol nu motteux ou d'une culture basse très couvrante : trèfle, haricot par exemple) qui comprendrait une première partie relativement sèche avec un flux de chaleur sensible de 200 Wm^{-1} et une zone aval fortement irriguée conduisant à une température d'équilibre beaucoup plus basse au niveau de la surface : soit environ 10°C de moins (nous supposons ici que cette température de surface est constante).

La variation de la hauteur de la couche limite au-dessus de laquelle ni les profils de températures, ni les flux ne sont modifiés, est illustrée par la figure 3 qui décrit également l'évolution des profils de température. Ce dernier profil évolue rapidement au voisinage de la surface pour les faibles abscisses et tend ensuite vers un profil de type logarithmique à évolution lente (fig. 4).

La surface comprise entre deux profils successifs de température représente l'énergie cédée par l'air à la surface aval plus froide que la zone amont et à l'air au-dessus de la couche limite pour assurer le flux amont. L'évolution du maximum de température tant qu'il existe, marque la limite entre ces deux contributions.

Pour certains auteurs, le phénomène d'advection est précisément traduit par cet apport d'énergie que l'air plus chaud au départ cède à la surface, accroissant d'autant (ou presque) son évapotranspiration de manière à satisfaire à l'équation 3, mais ce n'est là qu'une des caractéristiques de l'advection. Au fur et à mesure que l'air se refroidit, l'énergie cédée devient plus faible et l'évapotranspiration décroît. La figure 5 retrace l'évolution de cet apport d'énergie à la surface (flux de chaleur sensible) consécutif aux modifications thermiques de la masse d'air. Fortement positif au début (tant qu'il existe un maximum de température), ce flux s'annule aux alentours de 30 mètres et continue à décroître lentement : dans l'exemple choisi, il serait égal à — 73 Wm^{-2} à 1 km du bord d'attaque. Sur la même figure, on a également porté la valeur du flux moyen entre le bord d'attaque et le point d'abscisse x. On voit, sur

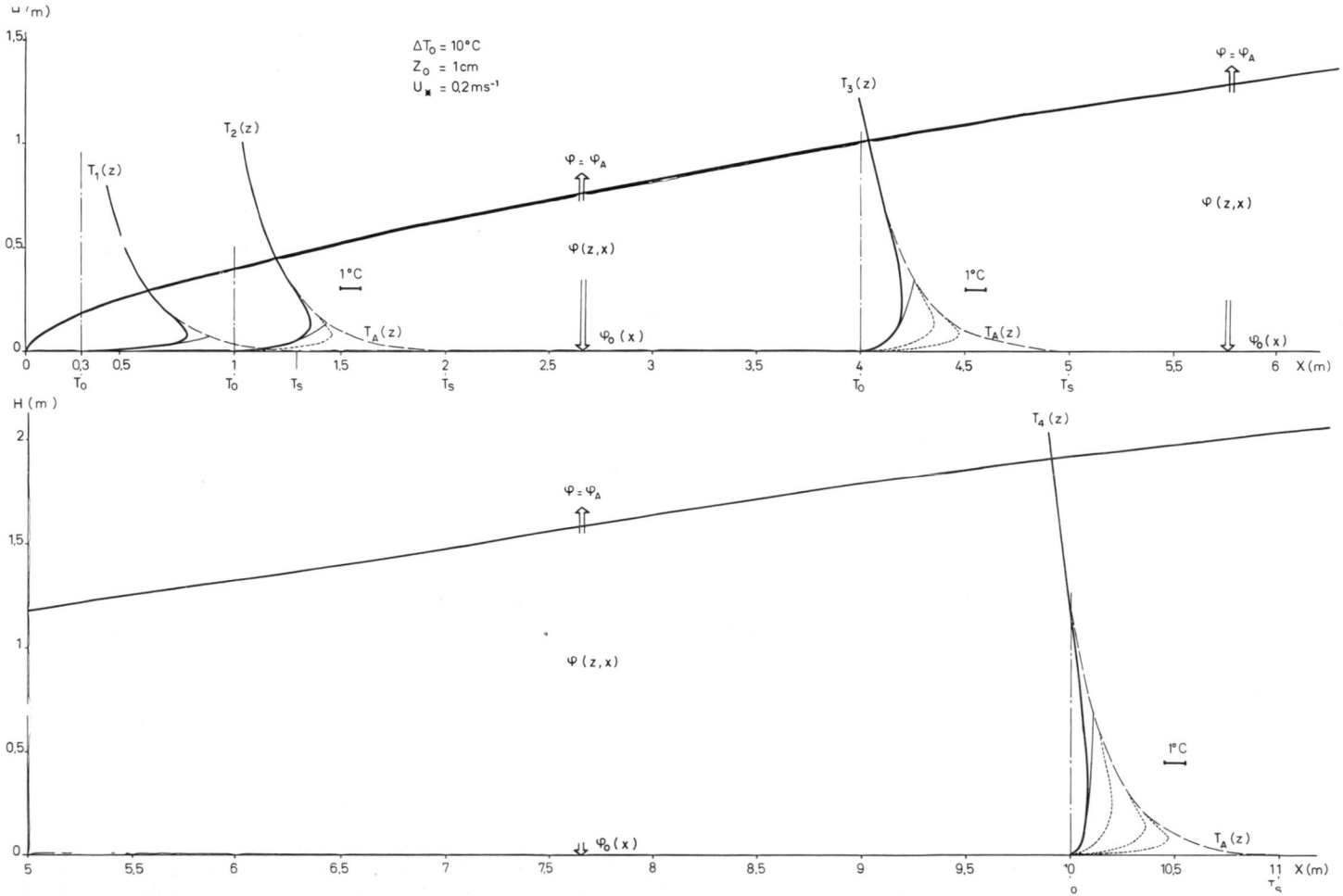


FIG. 3. — *Exemple d'évolution de la hauteur de la couche limite et des profils de température en fonction de la distance X pour les conditions suivantes :* $z_o = 10^{-2} m$; $U_* = 0{,}2\ ms^{-1}$; $\Delta T_o = 10_o C$

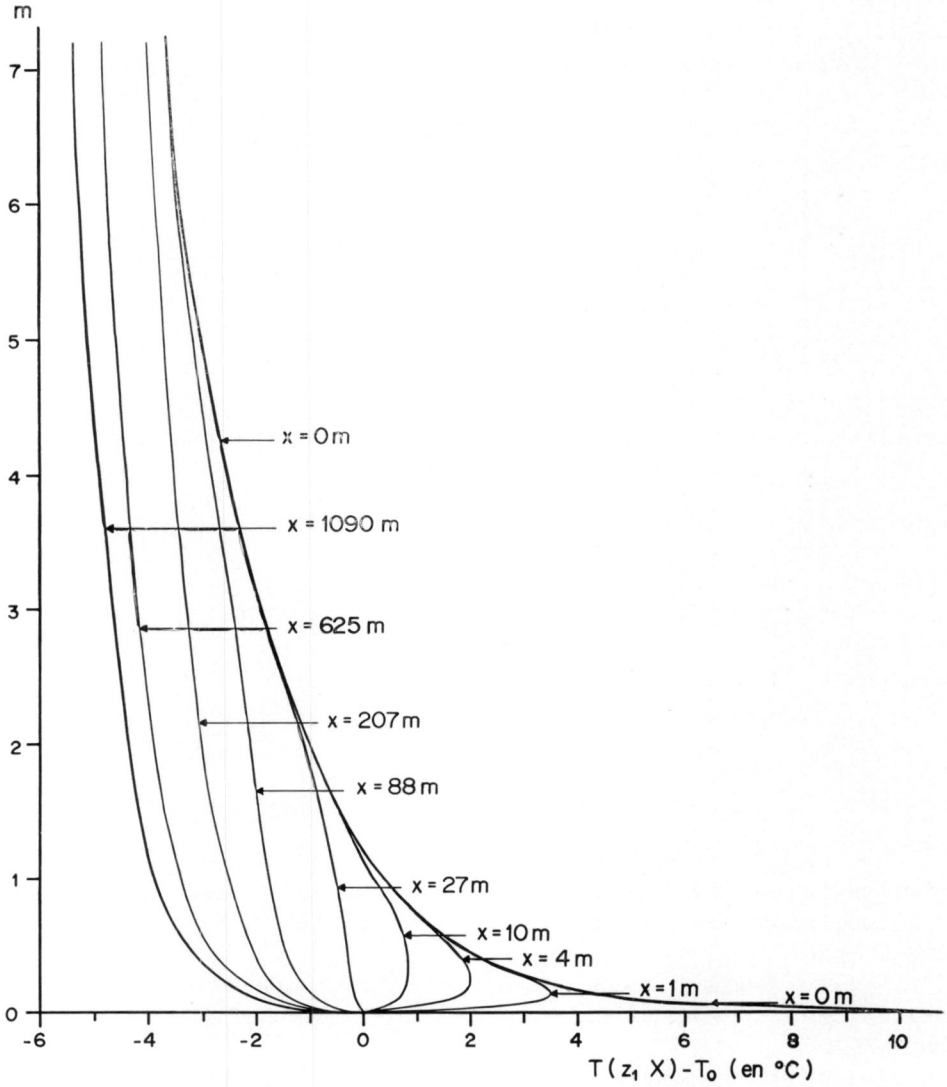


FIG. 4. — *Déformation du profil de température en fonction de la distance pour les conditions suivantes :*

$z_o = 10^{-2} m$; $U_* = 0{,}2\ ms^{-1}$; $\Delta T_o = 10^o C$

cet exemple, que le flux moyen s'annule pour une distance d'environ 100 mètres, ce qui signifie que pour un champ de cette dimension, placé dans les conditions rappelées ci-dessus, toute l'énergie apportée par rayonnement a, en moyenne, servi uniquement à l'évapotranspiration (cas particulier où ET = Rn).

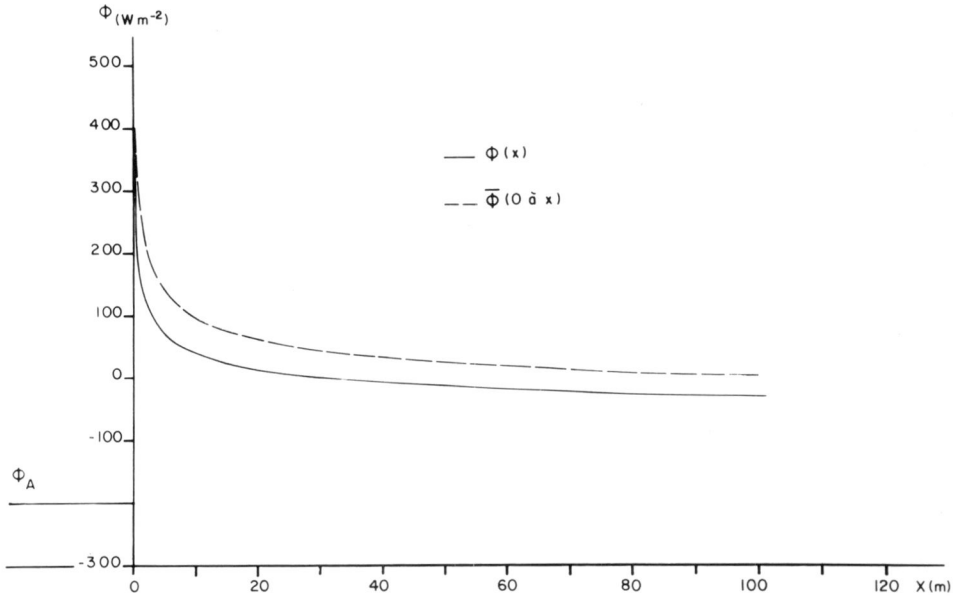


FIG. 5. — *Exemple d'évolution du flux de chaleur sensible en fonction de la distance pour les conditions suivantes :*
$z_0 = 10^{-2} m$; $U_* = 0{,}2\ ms^{-1}$: $\Delta T_0 = 10°C$; $\varnothing_A = -100\ Wm^{-2}$

B. — *Résultats adimensionnels et comparaisons*

Il est important de noter que compte tenu des lois de départ (U(z), K(z)) qui font intervenir l'épaisseur de rugosité z_0 et de l'étude comparée de la zone aval par rapport à la zone amont, les résultats peuvent se mettre sous formes adimensionnelles très générales.

— Les distances s'expriment de façon relative par rapport à z_0 ; on introduira ainsi la distance relative au bord d'attaque x/z_0 et la hauteur relative de la couche limite H/z_0.

— Les flux ou différences de flux par rapport à la zone amont s'écrivent aussi en fonction d'une grandeur caractéristique, ayant la dimension d'un flux : $ku_*\ \Delta C_0(x)$,

d'où : $$\Delta\varphi_0(x)/ku_*\Delta C_0(x)$$

a) *Cas d'une concentration de surface indépendante de l'abscisse.*

Les figures 6, 7 et 8 *a* illustrent les variations des trois paramètres $H(x)/z_0$, $\varphi_0(x)/ku_*\Delta C_0$ et $\Delta C(z, x)/\Delta C_0$ en fonction de x/z_0, distance au bord d'attaque.

La comparaison entre la couche limite externe obtenue ici et celle obtenue numériquement par TAYLOR (fig. 6) indique une très bonne concordance.

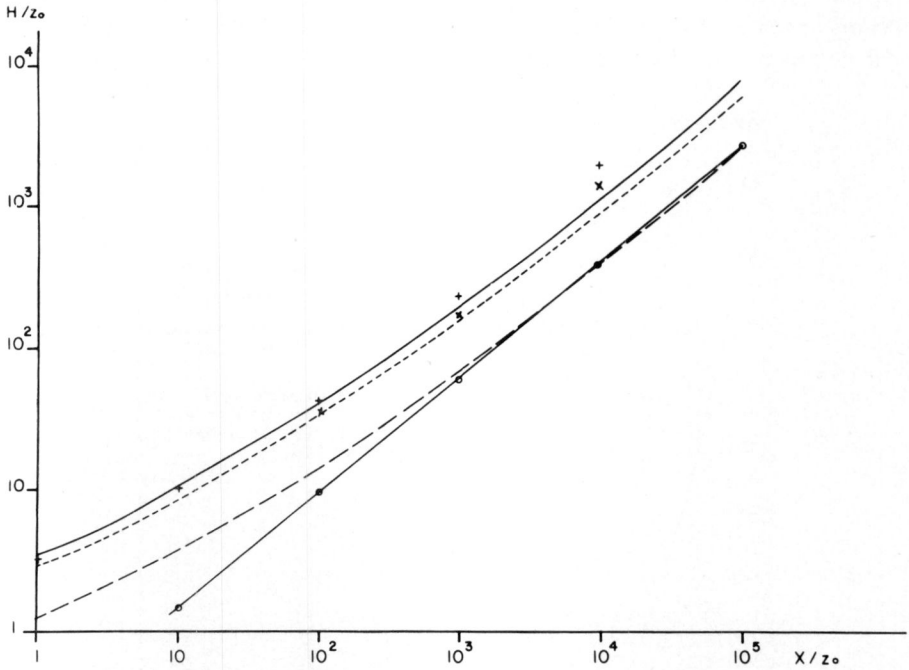


FIG. 6. — *Évolution des différentes couches limites*

$\Delta C_o(x)$ = cte : ——— calcul +++ TAYLOR 1970
$\Delta \varnothing_o(x)$ = cte : - - - - - calcul ××× TAYLOR 1971
Sous couche limite : — — — calcul o——o ELLIOT 1958

Pour des valeurs de $x/z_0 > 100$, on peut ajuster, à environ 1 p. 100, la courbe de variation de H/z_0 à une courbe en puissance de x/z_0 : $H/z_0 \sim (x/z_0)^{0,766}$.

Il nous a semblé intéressant de calculer, à partir de la définition d'ELLIOT (1958), la « couche limite interne » h/z_0, qu'il définit comme la hauteur où se recouperaient les flux aval et amont si tous deux assuraient des flux conservatifs, c'est-à-dire, s'ils étaient tous deux de forme logarithmique :

$$h/z_o = (e^{F(H/z^0)} - 1) \qquad (23) \text{ (cf. Annexe 5)}$$

Pour des valeurs de $x/z_0 > 100$, le rapport h/H est voisin de 0,345 et on peut assimiler cette deuxième hauteur à la courbe $h \sim 0,345\ (x/z^0)^{0,766}$, courbe très voisine de celle donnée par ELLIOT : $0,35\ (x)^{0,8}$.

La variation du flux adimensionnel (fig. 7) a aussi été comparée à celle trouvée par différents auteurs. Les résultats obtenus ici sont en très bon accord avec ceux fournis par TAYLOR dans le cas où les changements de température n'influencent pas le coefficient d'échange. Par rapport à l'approximation d'ELLIOT, reprise récemment entre autres par BOUCHET, FORTIN et SEGUIN (1974), les résultats apparaissent encore très concordants au-dessus de $x/z_0 = 100$, mais divergent très rapidement au-dessous.

Quant à ceux obtenus par PERRIER (1974) à partir de la théorie de PHILIP (1958) dont certains paramètres des lois en puissance ont été spécifiés, ils divergent plus

nettement et dépendent légèrement de la valeur de z_0 choisie contrairement au développement exposé ici, la concordance avec nos résultats n'apparaissant qu'à partir de valeurs de $x/z_0 > 1\,000$.

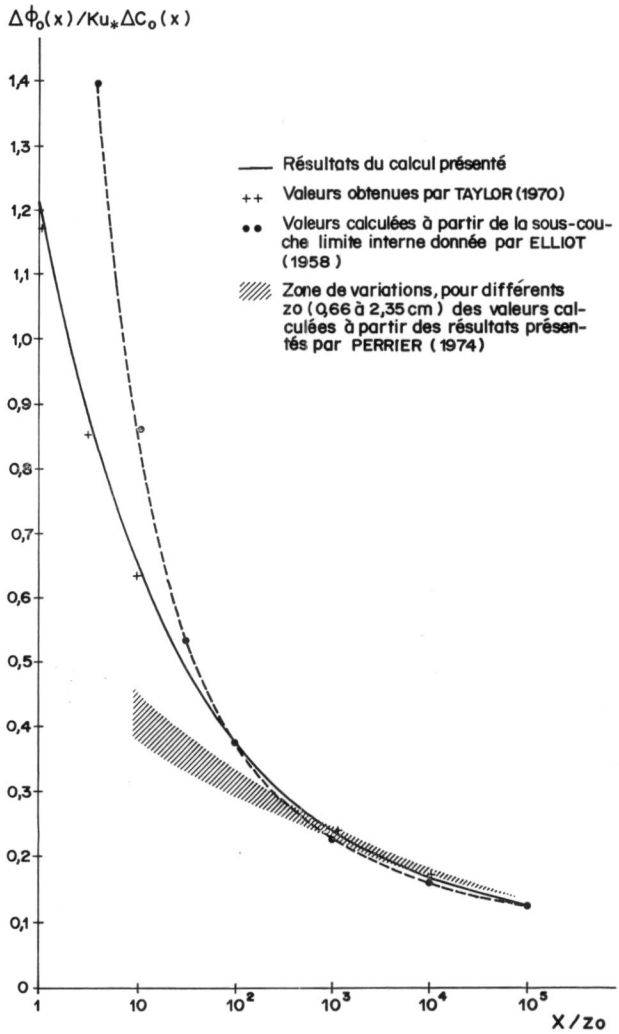
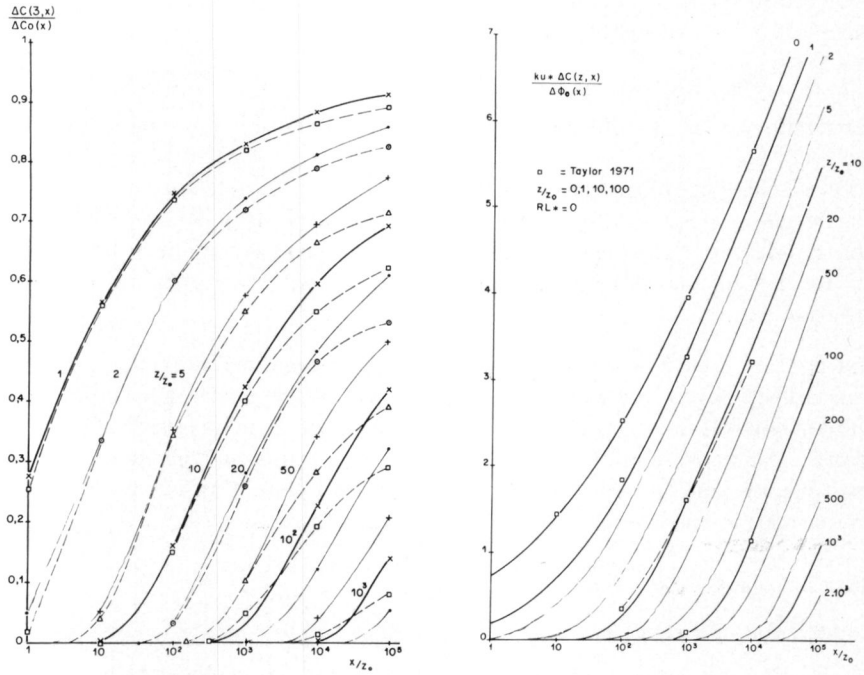


FIG. 7. — *Évolution de l'écart de flux adimensionné en fonction du rapport de la distance à l'épaisseur de rugosité*

L'évolution du rapport $(\Delta C(z, x)/\Delta C_0)$ tel qu'il a été déterminé par TAYLOR et par nous-mêmes (fig. 8) traduit la façon dont se résorbe dans l'air la différence de concentration imposée au sol. On peut remarquer la bonne concordance qui existe entre notre calcul analytique basé sur l'équation de conservation simplifiée et le calcul numérique de TAYLOR effectué directement à partir des équations différentielles de base : équation de conservation et équation de continuité (TAYLOR 1970, fig. 6 modifiée).



a *b*

FIG. 8. — *Évolution en fonction de la distance et de la hauteur, de l'écart de concentration entre les zones aval et amont*

a) Écart rapporté à la concentration de surface

× × □ □
·———· calcul présenté ; ○ — — ○ TAYLOR 1970
+ + Δ Δ

b) Écart rapporté au flux de surface

——— calcul présenté ; □ — — □ TAYLOR 1971

Une différence de l'ordre de 10 p. 100 apparaît seulement à une distance de $\frac{x}{z_0} \sim 10^5$, mais à cette distance, on peut se poser la question de la signification de la couche limite développée $\left(\frac{H}{z_0} \sim 7\ 10^3\right.$, c'est-à-dire H de l'ordre de 100 m$\left.\right)$, car l'écoulement ne peut plus être considéré comme parallèle à la surface jusqu'à cette hauteur où très certainement des cellules de convection perturbent très largement le type d'écoulement admis en début d'analyse.

b) *Flux de surface imposé* : $\Delta\varphi_0(x) = \Delta\varphi_0$.

Les figures 6 et 8 *b* illustrent cette fois-ci l'évolution des quantités H/z_0 et $ku_* \Delta C(z, x)/\Delta\varphi_0$.

On constate (fig. 6) que la hauteur de la couche limite est légèrement inférieure à celle développée lorsque ΔC_0 est constant : rapport voisin de 0,85. Les valeurs données par TAYLOR (1970, fig. 6 et 1971, fig. 5), quoique légèrement supérieures pour $x/z_0 > 10^4$, restent dans un rapport très voisin de cette valeur pour toute la gamme de variation de x/z_0.

La figure 8 *b*, où sont également portées les valeurs données par TAYLOR (1971, fig. 5 modifiée) montre comment l'air est progressivement enrichi par l'émission (gaz ou polluant) du sol. La concordance avec les résultats de TAYLOR est ici bien meilleure que dans le cas de la figure 8 *a*. Ceci peut peut-être s'expliquer par le fait que nous n'avons disposé pour la comparaison de la figure 8 *a*, que d'un cas où la structure thermique de l'air intervenait ($RL_* = 10^{-2}$; voir TAYLOR, 1970).

c) *Cas d'un changement d'humidité de surface.*

Nous avons vu (I, C, c) qu'il intervient dans ce cas, deux variables :

1) l'écart d'humidité, que l'on traduit par l'écart des coefficients β.

(avec $\beta = \frac{PH_2O}{Psat\ (T)}$, équivalent à l'humidité relative en équilibre avec la surface)

2) l'écart d'albédo consécutif au changement d'humidité, associé au rayonnement global.

Les évolutions des flux et concentrations dépendent des couples ΔaRg et $\Delta\beta$.

Même en traitant les gaz ou polluants de façon passive, il ne sera pas possible d'obtenir des lois générales à partir des relations 7, 8 et 9, comme cela a été indiqué dans le paragraphe 1, C. c.

Pour étudier le sens d'évolution du phénomène en fonction de ΔaRg et de $\Delta\beta$, nous avons donc choisi trois cas particuliers :

1) $\beta_A = 0{,}1 \quad \beta = 1 \quad \Delta aRg = 0$
2) $\beta_A = 0{,}1 \quad \beta = 1 \quad \Delta aRg = 100$
3) $\beta_A = 0{,}9 \quad \beta = 1 \quad \Delta aRg = 0$

L'évolution de la hauteur de la couche montre, comme le laissait prévoir l'équation du bilan d'énergie, que l'on se rapproche davantage d'un cas d'advection à flux constant que d'un cas à concentration constante. On peut, en effet, comparer les valeurs de x/z_0 atteintes, lorsque H/z_0 est égal à 10^4.

	ΔC_0 = Cte	Cas 1	Cas 2	Cas 3	$\Delta\varphi_0$ = Cte
$X/z_0 \cdot 10^{-2}$	1 419	1 589	1 589	1 594	1 608

On peut d'ailleurs vérifier sur la figure 9 que la variation relative de l'écart de flux au sol est très faible : $0{,}9 \leqslant \dfrac{\Delta\varphi_0\,(x)}{\Delta\varphi_0\,(x = 0)} < 1$.

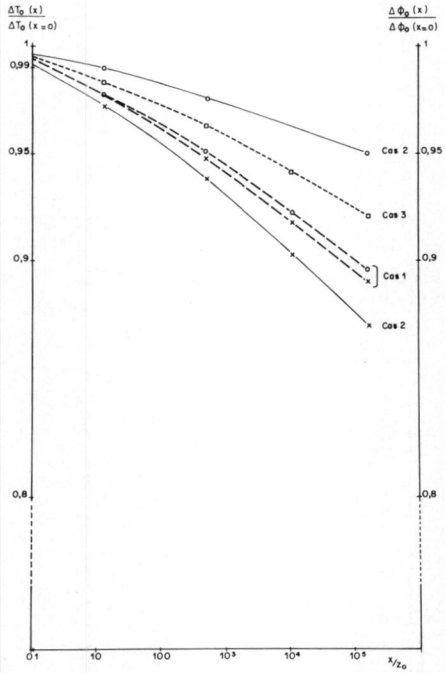


FIG. 9. — *Évolution, pour 3 cas de changement d'humidité de surface, de l'écart de température et de l'écart de flux d'enthalpie, rapportés à leurs valeurs au bord d'attaque.*

$$\left.\begin{array}{l} \text{cas 1} : \beta : 0{,}1 \rightarrow 1, \Delta a\mathrm{R}g = 0 \\ \text{cas 2} : \beta : 0{,}1 \rightarrow 1, \Delta a\mathrm{R}g = 100 \\ \text{cas 3} : \beta : 0{,}9 \rightarrow 1, \Delta a\mathrm{R}g = 0 \end{array}\right\} \text{(voir texte)}$$

Puisque l'écart de température est directement relié à l'écart de flux d'enthalpie (cf. éq. 16 *b*), il en sera de même pour l'écart relatif de température $\dfrac{\Delta T_0(x)}{\Delta T_0(x = 0)}$.

On constate sur la figure 9 que d'une diminution de $\Delta\beta$ résulte une diminution simultanée de la variation des deux paramètres $\dfrac{\Delta\varphi_0(x)}{\Delta\varphi_{00}}$ et $\dfrac{\Delta T_0(x)}{\Delta T_{00}}$ (cas 1 à cas 3).

Une variation de l'écart d'albédo a par contre un effet contraire sur chacun d'eux (cas 1 à cas 2).

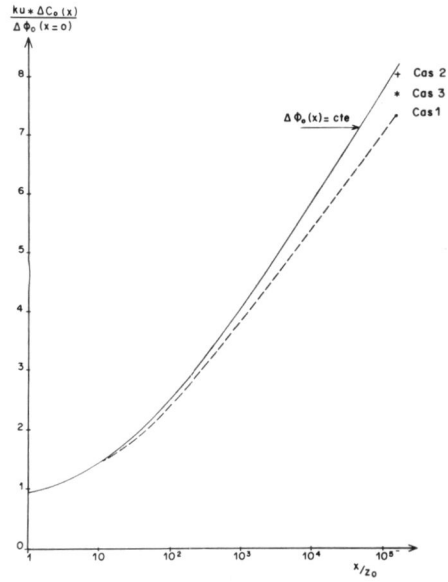


FIG. 10. — *Évolution pour 3 cas de changement d'humidité de surface, de l'écart de concentration enthalpique comparé à la même quantité si le flux était imposé* (cf. fig. 8b, $z/z_0 = 0$). Cas 1, 2, 3 : cf. fig. 9.

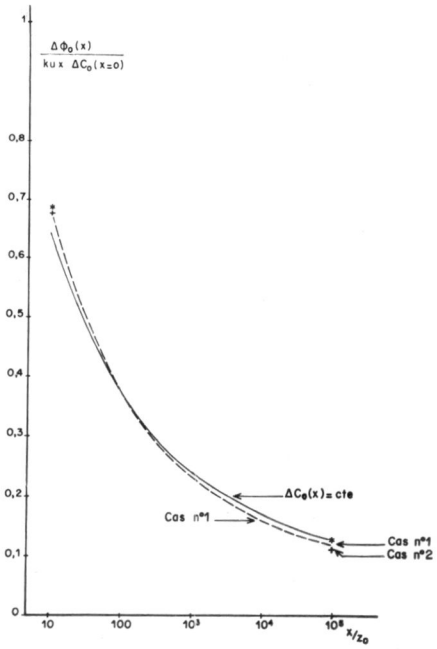


FIG. 11. — *Évolution pour 3 cas de changement d'humidité de surface, de l'écart de flux adimensionnel de chaleur sensible comparé à la même quantité si la concentration surfacique était fixée* (cf. fig. 7). Cas 1, 2, 3 : cf. fig. 9.

Ainsi, dans le cas où l'advection est due à un changement d'humidité, on peut penser que l'on pourra étudier l'évolution des flux et profils d'enthalpie, comme des cas d'advection à flux quasi-constant puisque $\frac{\Delta\varphi_0(x)}{\Delta\varphi_0(x=0)} \sim 1$. Si par contre, on veut étudier chacun des flux et profils qui composent cette enthalpie (chaleur sensible et chaleur latente), on pourra certainement les étudier comme des cas d'advection à concentration de surface quasi-constante puisque $\frac{\Delta T_0(x)}{\Delta T_0(x=0)} = \frac{\Delta C_0(x)}{\Delta C_0(x=0)} \sim 1$.

Ceci est illustré par les figures 10 et 11.

Sur la première (10), on a comparé l'évolution de l'écart de concentration enthalpique de surface pour les trois cas étudiés à l'évolution de concentration qu'on aurait pour un flux constant en zone aval (cf. fig. 8 *b*).

Sur la seconde (fig. 11), on a comparé l'évolution du flux de chaleur sensible à celle qu'aurait donné une température fixe imposée en zone aval.

On constate sur les deux figures que la différence entre la courbe la plus éloignée (cas 1) et les courbes correspondant respectivement à $\Delta C_0(x) = \text{cte}$ et $\Delta\varphi_0(x) = \text{cte}$ est toujours inférieure à 10 p. 100.

L'ensemble des résultats souligne d'une part, la bonne convergence des résultats analytiques obtenus par rapport au développement numérique donné par TAYLOR ; d'autre part, ils soulignent la grande généralité des résultats présentés puisqu'ils s'appliquent à n'importe quelles conditions de zones amont et aval (rugosité, vitesse de frottement liée au flux de quantité de mouvement, écart de concentration). Il faut toutefois rappeler ici qu'ils ne peuvent s'appliquer que dans le cadre de l'étude définie précédemment, c'est-à-dire :

— régime permanent,

— pas de changement de rugosité entre les zones amont et aval,

— diffusion neutre (diffusivité turbulente indépendante des profils de concentration).

Compte tenu de ces restrictions, l'étude présentée ne constitue qu'une première étape dans l'élaboration d'un modèle plus général.

4. — APPLICATIONS : DÉFINITION DE DEUX SOUS COUCHES-LIMITES ET FLUX MOYEN

L'étude, dont on vient de développer la théorie, peut permettre de répondre à un certain nombre de questions d'intérêt agronomique concernant aussi bien les erreurs que l'on commet en employant des méthodes de mesure qui ne tiennent pas compte de l'advection et les moyens simples que l'on pourrait employer à posteriori pour y remédier, que l'influence des caractéristiques physiques des couverts végétaux sur la répartition et l'intensité des échanges. L'exposé de l'ensemble des applications agronomiques fera l'objet du chapitre II publié ultérieurement. Nous nous contenterons d'aborder ici la définition de deux « sous-couches limites », une sous-couche à flux quasi conservatif et une sous-couche à erreur constante, et nous définirons, à partir des relations entre l'écart de flux à une abscisse donnée et le flux moyen jusqu'à cette abscisse, deux courbes d'approximation de la variation du flux.

A. — *Sous-couche limite à écart de flux quasi-conservatif*

L'ensemble des mesures indirectes des flux (WEBB, 1965 ; PERRIER et SEGUIN, 1970) comme l'ensemble des modèles de fonctionnement de la végétation (UCHIJIMA, 1962 ; PHILIP, 1964 ; PERRIER, 1967 ; COWAN, 1968 ; THOM, 1972) admettent que l'on se trouve en régime de flux conservatif ; il était intéressant d'entreprendre une analyse des erreurs que cette hypothèse implique et d'en tirer un certain nombre de conclusions quant aux précautions qu'il conviendrait de prendre.

Les résultats détaillés de cette étude ne sont pas présentés ici, ils feront eux aussi l'objet d'une prochaine publication.

Il nous a toutefois paru intéressant de définir, afin que chaque expérimentateur puisse utiliser cette grandeur, la zone de hauteur $h'(x)$ qui pourrait être assimilée à une zone de flux quasi conservatif, c'est-à-dire, telle que la différence de flux entre la zone amont et la zone aval se conserve à mieux que x p. 100 (généralement 5 à 10 p. 100). Si par exemple, on fixe le pourcentage à 5 p. 100, on voit (cf. fig. 2 : $f(z/\mathrm{H}) = 0{,}95$) que la hauteur h' est approximativement égale à H/10.

On pourra donc effectuer des mesures et les extrapoler vers le sol (cas des modèles), en appliquant l'hypothèse de la conservation des flux en dessous d'une hauteur h_1 telle que :

$$\frac{h'}{z_0}(x) \sim 0{,}1 \left(\frac{x}{z_0}\right)^{0{,}766} \text{ pour } x/z_0 > 100$$

soit :

$$h'(x) \sim 0{,}1\, z_0^{1/4}\, x^{3/4}$$

Il est cependant à noter que ce n'est pas le flux lui-même qui se conserve à mieux de 5 p. 100, mais l'écart de flux par rapport à la zone amont. L'erreur relative vraie $\dfrac{\varphi(h', x) - \varphi_0(x)}{\varphi_0(x)}$ dépendra des valeurs amont et de la valeur au sol :

$$\frac{\varphi(h', x) - \varphi_0(x)}{\varphi_0(x)} = 0{,}05 \cdot \left(\frac{\varphi_A}{\varphi_0(x)} - 1\right)$$

$$\varphi_A = -200\ \mathrm{W}m^{-2} \quad \varphi_0(x) = 200\ \mathrm{W}m^{-2} \quad \frac{\varphi(h', x) - \varphi_0(x)}{\varphi_0(x)} = -10 \text{ p. } 100$$

$$\varphi_A = 100\ \mathrm{W}m^{-2} \quad \varphi_0(x) = 200\ \mathrm{W}m^{-2} \quad \frac{\varphi(h', x) - \varphi_0(x)}{\varphi_0(x)} = -2{,}5 \text{ p. } 100$$

B. — *Sous-couche limite à flux fixé à* $\pm\ \delta(\mathrm{W}m^{-2})$

L'utilisateur qui voudrait connaître un flux $a \pm \delta$ W/m² devra travailler au-dessous d'une hauteur $h''(x)$ telle que : cf. équ. 5 et 7).

$$f\left(\frac{h''}{\mathrm{H}}\right) = 1 - \frac{\delta \cdot \mathrm{F}(\mathrm{H}/z_0)}{k u_* \Delta \mathrm{C}_0(x)} = 1 - \alpha\, \mathrm{F}(\mathrm{H}/z_0)$$

La figure 12 donne la valeur de cette hauteur pour différentes distances x/z_0 et différentes valeurs de $\delta/k u_* \Delta \mathrm{C}_0$. Tant que cette hauteur n'est pas voisine de

H/z_0, ($x/z_0 < 10^3$ pour $\alpha = 0{,}2$ et $x/z_0 < 5{,}10^4$ pour $\alpha = 0{,}1$), l'évolution est parallèle à la courbe $(x/z_0)^{3/4}$ (pointillés) et l'on peut écrire que :

$$\frac{h''}{z_0} \sim 1{,}5 \left(\frac{\delta}{ku_*\Delta C_0}\right)^{4/7} \left(\frac{x}{z_0}\right)^{3/4}$$

ex. sur gazon ($z_0 \sim 10^{-2}$) avec $ku_*\Delta C_0 \sim 1\,000$, il faudra, pour obtenir des flux à mieux de 10 Wm^{-2}, se placer en dessous de 0,40 m à une distance de 30 mètres du bord.

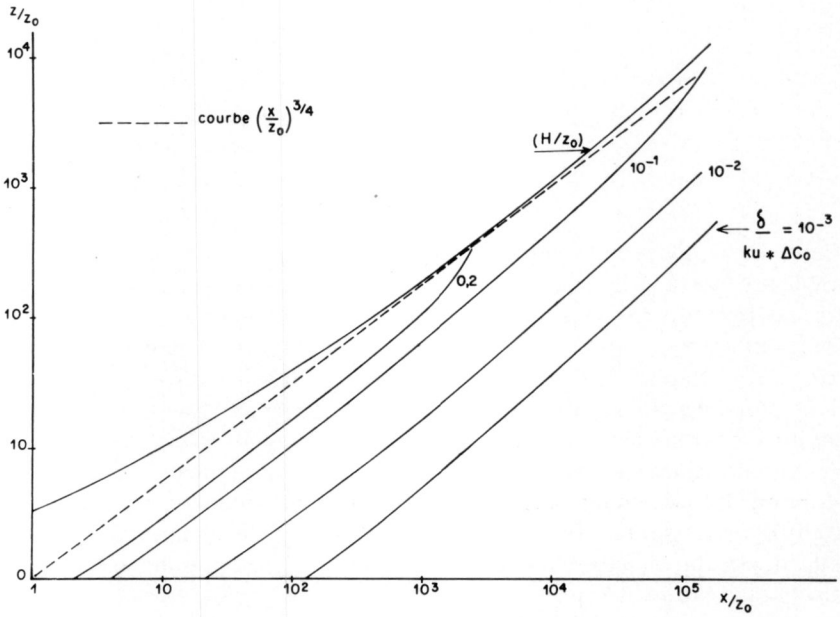


FIG. 12. — *Évolution de la hauteur de la couche limite h_2 à variation de flux fixée pour diverses valeurs de l'erreur admise δ*

C. — *Flux moyen, abscisse de mesure du flux moyen et approximations de la variation du flux*

Sans vouloir anticiper sur les applications agronomiques, notamment sur les moyens de mesure de l'évapotranspiration, il est intéressant de comparer l'évolution, en fonction de x/z_0, du flux adimensionné $\Delta\varphi_0(x)/ku_*\Delta C_0$ et de la valeur moyenne de ce flux entre le bord d'attaque et l'abscisse x/z_0 :

$$\left[\overline{\Delta\varphi}\right]_o^{x/zo} = \frac{z_0}{x}\int_o^{x/zo} \Delta\varphi_0(x)$$

puisque $\Delta\varphi_0(x)$ est une fonction décroissante de x, il existe toujours une valeur μ telle que :

$$\left[\overline{\Delta\varphi}\right]_o^{x/zo} = \Delta\varphi_0(\mu \cdot x/z_0)$$

Cette valeur μ varie très lentement en fontion de x/z_0. Elle passe de 0,293 pour $x/z_0 \sim 10$ à 0,318 pour $x/z_0 \sim 10^5$.

Si la variable μ était strictement indépendante de x/z_0, on pourrait démontrer mathématiquement que sur toute la gamme des valeurs de x/z_0, l'écart de flux adimentionné, $\Delta\varphi_0\ ((x)/ku_*\Delta C_0(x)$, varie comme $(x/z_0)^n$ avec $\frac{1}{\mu} = (1 + n)^{1/n}$.

En pratique, malgré la faible variation de μ, on sera amené à définir deux courbe d'approximation, à mieux de 5 p. 100 pour 2 domaines distincts :

$$10 \leqslant x/z_0 \leqslant 10^3 \quad \frac{\Delta\varphi_0(x)}{ku_*\Delta C_0(x)} \sim 0{,}887 \left(\frac{x}{z_0}\right)^{-0{,}19}$$

$$10^3 \leqslant x/z_0 \leqslant 10^5 \quad \frac{\Delta\varphi_0(x)}{ku_*\Delta C_0(x)} \sim 0{,}665 \left(\frac{x}{z_0}\right)^{-0{,}15}$$

5. — CONCLUSION

Cette étude, de type essentiellement analytique permet de traiter un ensemble de problèmes liés au cas simple d'une advection sans changement de rugosité de surface. Les résultats très voisins de ceux obtenus récemment par TAYLOR (1970 *a* et *b*) et assez semblables à ceux donnés par des théories plus ou moins simplificatrices (ELLIOT, 1948 ; PHILIP, 1958) justifient la validité du schéma de calcul choisi et les solutions proposées. Le modèle propose, de plus, une solution au cas du changement d'humidité en définissant, au moyen de l'équation du bilan d'énergie, l'évolution des flux et concentrations de surface dans ce cas précis où ni les uns, ni les autres ne sont fixés à priori. L'assez bonne cohérence des études théoriques concernant l'advection, au moins dans la gamme des abscisses x sous le vent de dimension significative à l'échelle des surfaces naturelles (allant du mètre à quelques kilomètres), suggère que la quantification des phénomènes liés à l'advection est possible et offre une certaine fiabilité.

Dans le domaine de l'étude du milieu naturel, une solution aisément calculable et adaptable à toutes les conditions particulières d'un problème d'advection est donc un outil puissant, qui doit permettre de limiter le domaine de validité des mesures généralement faites dans des conditions supposées parfaitement homogènes, de préciser l'évolution des phénomènes dans le cas d'une hétérogénéité horizontale et au besoin de prévoir et de calculer un grand nombre de paramètres (flux ou concentrations) toujours dans le cas de cette hétérogénéité.

Cette étude fournit donc un moyen analytique pour passer des conditions jusqu'ici pratiquement toujours admises de conservativité verticale des flux (homogénéité horizontale) à celles dues à une hétérogénéité horizontale sous le vent. Ce n'est évidemment qu'un premier pas qui ne permet de traiter qu'un certain nombre de problèmes, agronomiques notamment *, mais qui doit se poursuivre par l'analyse de toutes les formes de variation horizontale (en particulier rugosité et caractéristiques aérodynamiques comme la hauteur du déplacement du plan de référence pour les couverts végétaux), de leur différent couplage et de l'imbrication successive de ces diverses variations, l'étude de ces variations spatiales pouvant naturellement

* Le chapitre II traitera de l'ensemble des applications agronomiques de cette étude.

être transposée à l'étude des variations temporelles des conditions climatiques et de leurs conséquences.

Dans un premier temps, une série de déterminations expérimentales seront entreprises sur petites surfaces (quelques dizaines de mètres, après une surface amont de plusieurs centaines de mètres), pour vérifier l'exactitude du modèle présenté et pour essayer de trouver par la mesure une confirmation de l'évolution des profils de température (fig. 3) et l'évolution de l'évaporation en fonction de la distance sous le vent (fig. 5) : ces grandeurs étant les plus simples à obtenir dans les conditions naturelles.

Dans un second temps, des expérimentations sur des distances plus vastes sont envisagées, en particulier pour ce qui concerne les paramètres les plus simples qui sont les températures de la masse d'air et les températures de surface dont la mesure peut s'effectuer au moyen de la télédétection ; on pourrait y adjoindre quelques mesures complémentaires telles que celles obtenues par des dispositifs automatiques BEARN (PERRIER *et al.*, 1975) que nous avons mis au point et qui permettraient d'avoir quelques valeurs des termes du bilan d'énergie (flux) concernant la zone amont et, en un ou deux points, la zone aval.

Reçu pour publication en mai 1976.

SUMMARY

AN ANALYTICAL STUDY OF ADVECTION
I. — ADVECTION WITH RESPECT TO RELATION WITH TEMPERATURE, CONCENTRATION AND HUMIDITY

Variations with length in the concentrations (heat, H_2O, ...) and in their fluxes due to sudden changes in surface parameters such as temperature or humidity, but of the same roughness, between a conservative upwind region and one downwind.

The analytical solution gives results closed to those obtained numerically by Taylor (1970-1971) for the two cases usually analysed *i. e.* : constant surface concentration and constant surface flux.

Furthermore, we give a solution for the case where surface humidity is kept constant. This third case can be compared with the first one for the evolution of the two convective fluxes (sensible and latent heat (fig. 10), and with the second for the evolution of the available enthalpy concentration and flux (fig. 11).

The advective flux varies as $x^{-0,15}$ and the mean flux on a field (O-X) is given by the local flux at $\frac{3X}{10}$ downwind.

ZUSAMMENFASSUNG

VORLEGUNG EINER ANALYTISCHEN UNTERSUCHUNG DER ADVEKTION :
I. — DIE ABHÄNGIGKEIT DER ADVEKTION VON DEN HORIZONTALEN SCHWANKUNGEN DER KONZENTRATION UND DER TEMPERATUR

Der Zweck der vorliegenden Arbeit ist es, eine Untersuchung der Advektion vorzulegen, dass heisst, diejenigen Schwankungen der mikroklimatischen Faktoren (Temperatur, Feuchtigkeit)... und der Strömungen (Wärme, Verdunstung, ...) zu studieren, die nache iner plötzlichen

Änderung der Oberflächekennzeichen (Temperatur, Feuchtigkeit...) zwischen einer homogenen Zone stromaufwärts und einer Zone stromabwärts eintreten, doch mit Ausschluss irgendeiner Veränderung der Rauhigkeit.

Hier wird eine analytische Behandlung der zwei üblich studierten Fälle, nämlich der konstanten Konzentration an der Boden-Oberfläche und des konstanten Oberflächenstroms, dargestellt. Die hier ermittelten Ergebnisse stimmen weitgehend überein mit dengenigen, den TAYLOR numerisch erhalten hat (1970, 71).

Durch diese analytische Behandlung wird es auch möglich, eine Lösung für den Fall der konstanten Oberflächenfeuchtigkeit zu vermitteln, und dadurch das Gesetz des Verlaufes der Oberflächentemperatur und der gleichzeitigen Anderung der Ströme fühlbarer und latenter Wärme zu formulieren. Es wird gezeigt, dass die durch eine Änderung der Feuchtigkeit verursachte Advektion praktisch ähnlich einer Advektion mit konstanter Oberflächenkonzentration ist, wenn die zwei Ströme einzeln betrachtet werden, und ähnlich einer Advektion mit konstantem Enthalpie-strom, wenn die zwei Ströme summiert werden (Abb. 10 und II).

Die Änderung der Stromabweichung zwischen beiden Zonen, stromauftwärts und stromabwärts, gehorcht näherungsweise einem Gesetz $x^{-0,15}$ und der mittlere Strom einer Zone O-X ist demjenigen, an der Abzisse 3 X/10 leewärts gemessenen, nahe.

РЕЗЮМЕ

Аналитическое изучение адвекции. — I. Адвекция связанная с горизонтальными изменениями концентрации и температуры.

Б. ИТЬЕ, А. ПЕРРЬЕ.

Данный труд представляет изучение адвекции, т.е. долготных изменений микроклиматических факторов (температура, влажность...) и потоков (теплота, испарение) между верховой гомогенной и низинной зонами, вызванных внезапным изменением характерностей поверхности (температура, влажность...), за исключением какого — бы ни было изменения бугорчатости.

Решение, аналитического типа, которое было принято, дает результаты приближающиеся к результатам полученным с применением цифрового метода Тайлором (1970 и 1971) для двух обычно изучавшихся случаев : постоянной поверхностной концентрации и постоянного поверхностного потока.

Оно дает также возможность разрешения вопроса в случае постоянной поверхностной влажности и позволяет вывести формулу одновременной эволюции поверхностной температуры и чувствительного и латентного потоков тепла. В труде этом доказывается что адвекция вызванная изменением влажности практически является в одно и то-же время адвекцией постоянной поверхностной концентрации двух потоков взятых по отдельности, и суммой этих адвекций при постоянной энтальпии потоков (Рис. 10 и 11).

По этому закону, колебания потока между верховой и низинной зонами изменяются приблизительно по формуле $x^{-0,15}$ а средний поток зоны о-х приближается к потоку измеренному по абсциссе $\frac{3\,x}{10}$ под ветром.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUCHET R. J., FORTIN J. P., SEGUIN B., 1974. Modification des facteurs climatiques et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par l'irrigation. *Soc. Hydrotech. de France*, 13e journées de l'hydraulique (Paris sept. 74).

BOUCHET R. J., PERRIER A., 1973. Bilan d'énergie et évapotranspiration à différentes échelles. UNESCO, Paris, *Le soleil au service de l'homme.*

COWAN I. R., 1968. Mass, heat and momentum exchange between stands of plants and their atmospheric environment. *Quart. J. Roy. Soc.* **94**, 523-544.

ELLIOT W. P., 1958. The growth of the atmospheric internal boundary layer. *Trans. Amer. Geophys Union*, **39**, 1048.

LAIKHTMAN D. L. 1961. *Physics of the boundary layer of the atmosphere.* Oldbourne press (London), 200 p.

LUMLEY J. L., PAWOFSKY H. A., 1964. *The structure of atmospheric turbulence.* ed. John Wiley and Sons (New York), 239 p.

PERRIER A., 1967. Approche théorique de la microturbulence et des transferts dans les couverts végétaux en vue de l'analyse de la production végétale. La *Météorologie* I (4), 527-550.

PERRIER A., SEGUIN B., 1970. Méthodes et techniques de détermination des coefficients de transferts et des flux dans l'air. In « *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère* », I.N.R.A. Paris, 425-445.

PERRIER A., 1974. Advection et variations microclimatiques. *Soc. hydrotech. de France*, 13e. journées de l'hydraulique, Paris Sept. 74.

PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J. M., BLANCO DE PABLOS, 1975. Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture : exemple d'application. *Ann. agron.* **26** (1), 19-40.

PERRIER A., 1975. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. II. expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface « mince ». *Ann. agron.* **26** (2), 104-128.

PHILIP J. R., 1959. The theory of local advection : I. *J. of Met.* **16** (5), 553-547.

PHILIP J. R., 1964. Sources and transfer processes in the air layers occupied by vegetation *J. Appl. Meteor.* 3, 390-395.

PLATE E. J., 1971. *Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers.* ed. by U. S. atomic energy commission (Oak Ridye) 190 p.

SUTTON O. G., 1953. *Micrometeorology. A study of physical processes in the lowest layers of the earth's atmosphere.* M. Grow-Hill Boox Company (New York) 333 p.

TAYLOR P. A., 1969. On wind and shear stress profiles above a change in surface roughness. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **95** (403), 76-91.

TAYLOR P. A., 1970. A model of airflow above changes in surface heat flux, temperature and roughness for neutral and instable conditions. *Boundary layer Meteorol.* 1, 18-39.

TAYLOR P. A., 1971. Airflow above changes in surface heat flux, temperature and roughness ; an extension to include the stable case. *Boundary layer Meteorol.* 1, 474-497.

THOM A. S., 1972. Momemtum, mass and heat exchange of vegetation. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **98**, 124-134.

UCHIJIMA Z., 1962. Studies on the microclimate within the plant communities (1 and 2) *J. Agric. Meteorol.* **18** (1), 1-10 and **18** (2), 58-65.

WEBB E. K., 1965. Aerial microclimate. In : *Agricultural Meteorology*, chap. 2. WAGGONER P. E. et *al.*, ed. Meteorological monographs 6, **28**, 27-58.

WEISMAN R. N., 1965. A developing boundary layer over evaporating surface. *Boundary layer Meteorol.* **8**, 437-445.

ANNEXE 1

Démonstration de l'équation n° 7

D'après la relation 1 :

$$\Delta\varphi(z, x) = K(z) \frac{\partial}{\partial z} (\Delta C(z, x))$$

d'où

$$f(z, H) = \frac{K(z)}{\Delta\varphi_o(x)} \frac{\partial}{\partial z} (\Delta C(z, x))$$

et

$$\Delta C(z, x) = \Delta\varphi_o(x) \int \frac{f(z, H)}{K(z)} dz$$

puisque $\Delta C(H, x) = 0$, par définition de H (relation 4 *a*) :

$$\frac{\Delta C_o(x)}{\Delta\varphi_o(x)} = - \int_o^H \frac{f(z, H)}{K(z)} dz$$

ANNEXE 2

Démonstration de l'équation n° 8

$$\Delta C(z, x) = \Delta\varphi_0(x) \int \frac{f(z, H)}{K(z)} dz \qquad \text{(cf. annexe 1)}$$

$$\Delta C(z, x) - \Delta C_0(x) = \Delta\varphi_0(x) \int_o^z \frac{f(z, H)}{K(z)} dz$$

soit, en exprimant $\Delta\varphi_0(x)$ (cf. annexe 1)

$$\Delta C(z, x) = \Delta C_0(x) \cdot \left(1 - \frac{\int_o^z \frac{f(z, H)}{K(z)} dz}{\int_o^H \frac{f(z, H)}{K(z)} dz} \right)$$

ANNEXE 3

Démonstration de l'équation n° 9

D'après la relation de conservation (équation 2).

$$\int U(z) \frac{\partial}{\partial x} (\Delta C(z, x)) dz = \Delta\varphi(z, x)$$

si $H(x)$ est une fonction continue, univoque et monotone de x, alors $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{dH}{dx} \cdot \frac{\partial}{\partial H}$

et :
$$\int U(z) \cdot \frac{dH}{dx} \cdot \frac{\partial}{\partial H} (\Delta C(z, x)) \cdot dz = \Delta\varphi(z, x)$$

D'autre part, puisque $\frac{dH}{dx}$ ne dépend pas de z et que $\Delta\varphi(H, x) = 0$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{-\Delta\varphi_0(x)}{\int_0^H U(z) \cdot \frac{\partial}{\partial H} (\Delta C(z, x))\, dx}$$

ANNEXE 4

Expressions de $F(H/z_0)$ et $G(z/z_0, H/z_0)$

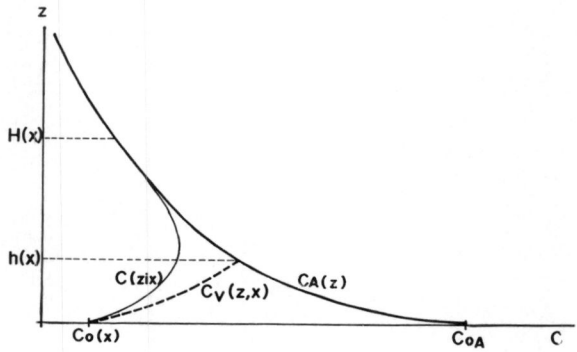
Soit $\eta = z_0/H$

$$F\left(\frac{H}{z_0}\right) = F\left(\frac{1}{\eta}\right) = -\frac{13}{12} + 3\eta + \frac{13}{2}\eta^2 + 3\eta^3 - \left\{3\eta^2 + 8\eta^3 + 6\eta^4 - 1\right\} \operatorname{Log}\left(\frac{1+\eta}{\eta}\right)$$

Soit $\psi = \frac{z + z_0}{H}$

$$\begin{aligned} G(z/z_0, H/z_0) = G\left(\frac{\psi}{\eta} - 1, \frac{1}{\eta}\right) = G(\psi, \eta) \\ -\frac{3}{4}(\psi^4 - \eta^4) + 4(\eta + \frac{2)}{3} \cdot (\psi^3 - \eta^3) \\ -3(3\eta^2 + 4\eta + 1)(\psi^2 - \eta^2) \\ +12(\eta^3 + 2\eta^2 + \eta)(\psi - \eta) \\ -3(\eta^4 + 8\eta^3 + 6\eta^2 - 1) \operatorname{Log}\frac{\psi}{\eta} \end{aligned}$$

ANNEXE 5



Soit $C_v\ (z, x)$ une concentration virtuelle qui serait telle que, compte tenu de la variation de $K(z)$ elle mesure un flux conservatif égal au flux du sol.

$$C_v\ (z, x) = C_0(x) + \varphi_0(x) \int_0^z \frac{dz}{K(z)}$$

le profil amont étant :

$$CA(z, x) = CA_0 + \varphi_A \int_0^z \frac{dz}{K(z)}$$

$h(x)$ est défini comme la hauteur ou se recoupent les profils $C_v\ (z, x)$ et $C_A(z)$,

soit : $$C_v\ (h, x) = C_A(h)$$

d'où : $$C_0(x) - C_{0A} = -\Delta\varphi_0(x) \int_0^h \frac{dz}{K(z)} = -\frac{\Delta\varphi_0(x)}{ku_*} \int_0^h \frac{dz}{z + z_0}$$

or (cf. équ. 7) $$\Delta C_0(x) = -F(H/z_0)\ \frac{\Delta\varphi_0(x)}{ku_*}$$

d'où : $$\int^h \frac{dz}{(z + z_0)} = F(H/z_0)$$

ce qui conduit à : $$h/z_0 = e^{F(H/z_0)} - 1$$

Ann. agron., 1976, **27** (2), 141-163.

ÉVAPOTRANSPIRATION ET CARACTÉRISTIQUES D'ÉCHANGE D'UN GAZON EN CLIMAT ÉQUATORIAL HUMIDE

G. GOSSE*

Office de la Recherche scientifique et Technique Outre-Mer,
Centre de Recherches d'Adiopodoumé,
Côte d'Ivoire

RÉSUMÉ

La méthode du bilan d'énergie est utilisée pour déterminer les différents flux d'énergie (sensible et latente) au niveau d'un gazon en milieu équatorial. De plus, le flux de chaleur latente ainsi obtenu a été comparé à ceux obtenus par d'autres techniques. L'utilisation simultanée des méthodes du bilan d'énergie et aérodynamique a permis d'expliquer, en termes de résistances, les variations du flux de chaleur latente et de mettre en évidence l'importance des phénomènes radiatifs. Des formules donnant l'évapotranspiration réelle maximale d'un gazon sont proposées pour des bases de temps de la journée et du mois.

LISTE DES SYMBOLES

a, a'	coefficients divers
A	énergie consommée ou dégagée par les systèmes biologiques
b, b'	coefficients divers
C, Ca, Cs	concentration au niveau de référence et au niveau de la surface de la culture (kg m^{-3})
D	hauteur de déplacement (m)

* Adresse actuelle : Station de Bioclimatologie, Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A., 78000 Versailles.

$\frac{dQ}{dt}$	variation d'énergie calorifique du système (W m^{-2})
E_a	évaporation qu'aurait la surface si sa température était celle de l'air T*a*, classiquement appelé pouvoir évaporant de l'air (W m^{-2})
ETP_o	évapotranspiration potentielle théorique au sens de Penman (W m^{-2})
ETP	évapotranspiration potentielle théorique d'un couvert à développement vertical (W m^{-2})
ETRM	évapotranspiration réelle maximale de la culture (W m^{-2})
ETR	évapotranspiration réelle d'une culture (W m^{-2})
Φ_L	flux de chaleur latente (W m^{-2})
Φ_o	flux de chaleur échangé par conduction avec le sol (W m^{-2})
Φ_s	flux de chaleur sensible (W m^{-2})
Φ_{BE}	flux de chaleur latente déterminé par la méthode du bilan d'énergie (W m^{-2})
Φ_{BAS}	flux de chaleur latente mesuré à l'évapotranspiromètre pesable (W m^{-2})
Φ_{AERO}	flux de chaleur latente déterminé par la méthode aérodynamique (W m^{-2})
γ	Constante psychrométrique
h	hauteur de la culture (m)
H	coefficient d'échange de la culture (m s^{-1})
HR.	humidité relative (%)
I_{ga}	valeur du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère (W m^{-2})
k	constante de Karman ($k = 0{,}42$)
k', k''	coefficients divers
$K(z)$	diffusivité turbulente au niveau z (m^2 s^{-1})
L	chaleur latente de vaporisation de l'eau (J kg^{-1})
M	masse moléculaire de l'eau ($M = 18\ 10^{-3}$ kg $Mole^{-1}$)
$P'(T)$	dérivée de l'expression de la tension de vapeur saturante pour la température T (Pascal $^oC^{-1}$)
r_a	résistance aérodynamique entre la surface du couvert et le niveau de référence z_r (s m^{-1})
r_c	résistance critique du couvert (s m^{-1})
r_o	résistance de structure du couvert (s m^{-1})
r_s	résistance stomatique du couvert (s m^{-1})
R	constante des gaz parfaits ($R = 8{,}32$ J $mole^{-1}$ $^oK^{-1}$)
R*g*	rayonnement solaire global (W m^{-2})
R*n*	rayonnement net de la culture (W m^{-2})
S	durée de la période d'insolation (heures)
S_{max}	durée du jour (heures)
t	temps
T	température absolue (^oK)

T_a, T_{a1}, T_{a2} température de l'air au niveau de référence z_r et aux niveaux z_1 et z_2 (°C)

T_h, T_{h1}, T_{h2} température du thermomètre mouillé au niveau de référence z_r et aux niveaux z_1 et z_2 (°C)

u^* vitesse de frottement (m s^{-1})

$u(z)$ vitesse du vent (m s^{-1})

z_1, z_2 hauteurs au-dessus de la culture des mesures de gradients destinées à la méthode du bilan d'énergie (m)

z_r hauteur de référence au-dessus de la culture (m)

z_o hauteur de rugosité (m)

INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie d'origine solaire et atmosphérique par un couvert végétal débouche sur deux grandes fonctions d'intérêt agronomique :

— la production de matière sèche par l'intermédiaire de l'ensemble des phénomènes photosynthétiques,

— la consommation en eau qui est le résultat d'une évaporation passive (sol-feuille humide) et d'une évaporation active ou transpiration, cette dualité étant résumée par le concept d'évapotranspiration.

Dans le cadre de cette étude réalisée en Côte d'Ivoire. nous présenterons les méthodes qui nous ont permis de mesurer ou d'estimer l'évapotranspiration d'un gazon à des échelles de temps de l'ordre de l'heure, puis nous dégagerons pour le couvert étudié, les relations existant entre la consommation en eau et des paramètres climatiques plus simples à mesurer (rayonnement net et global).

L'intérêt d'une telle étude est double :

— d'un point de vue théorique, une analyse fine du déterminisme de l'évapotranspiration d'un couvert permet surtout par l'intermédiaire des résistances du couvert (r_a, r_o, r_s) de mieux comprendre les interactions plante-atmosphère.

— d'un point de vue plus pratique, cette analyse permet une modélisation et une prévision de l'évapotranspiration d'une culture grâce à des paramètres climatiques simples, pour des zones géographiques présentant un climat semblable. Ce type de démarche présente un intérêt non négligeable, dans des régions où, comme en Côte d'Ivoire, les problèmes de maintenance de mesures délicates en réseau sont complexes.

Nous conclurons sur la présentation d'une formule d'évapotranspiration réelle maximale d'un gazon pour des périodes de temps utilisées en pratique (journée, décade ou mois). Cette ETRM gazon est actuellement considérée dans de nombreux pays comme la mesure servant de référence aux calculs de coefficients dits culturaux (ETRM culture/valeur de référence de l'évapotranspiration) ; de plus, pour d'autres auteurs (PERRIER, 1975), l'ETRM gazon pourrait être considérée comme l'enveloppe maximale des consommations en eau des cultures classiques, surtout pour des zones à climat humide.

I. — RAPPELS THÉORIQUES

Les échanges d'énergie d'une culture homogène et infinie avec l'atmosphère obéissent à la relation dite du bilan d'énergie qui traduit le principe de conservation de l'énergie :

$$Rn + \Phi_s + \Phi_L + \Phi_o + A = \frac{dQ}{dt} \tag{1}$$

Dans le cadre de la présente étude, couvert végétal à faible développement vertical assimilable à une surface mince et base de temps faible, l'équation précédente se réduit à :

$$Rn + \Phi_s + \Phi_L + \Phi_o = 0 \tag{2}$$

En effet, pour des surfaces minces, l'énergie A consommée ou dégagée par les systèmes biologiques est négligeable ; de plus, pour des régimes transitoires voisins du régime permanent, la variation d'énergie calorifique $\frac{dQ}{dt}$ est pratiquement nulle.

Dans ce cas, PERRIER et SEGUIN (1970) ont explicité la technique d'obtention des flux Φ_L et Φ_s, à partir des mesures Rn, Φ_o, T_{a1}-T_{a2}, T_{h1}-T_{h2}, T_{a1} et T_{h1}, soit :

$$\Phi_s = -\frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot (Rn + \Phi_o) \cdot \frac{\Delta T_a}{\Delta T_h}$$

$$\Phi_L = -(Rn + \Phi_o)\left(1 - \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{\Delta T_a}{\Delta T_h}\right)$$

avec $\Delta T_a = T_{a1} - T_{a2}$
$\Delta T_h = T_{h1} - T_{h2}$

La seule détermination des flux Φ_s et Φ_L ne permet pas une interprétation théorique des échanges ; il est nécessaire à cet effet d'introduire une information nouvelle et moins globale que le flux : le coefficient d'échange H de la culture.

En effet, un flux peut s'exprimer de trois manières différentes :

$$\Phi(z) = K(z) \cdot \frac{dC(z)}{dz} \tag{3a}$$

$$\Phi = H(C_a - C_s) \tag{3b}$$

$$\Phi = \frac{C_a - C_s}{r_a} \tag{3c}$$

La diffusivité turbulente $K(z)$ est une caractéristique des échanges turbulents au niveau z alors que le coefficient d'échange H présente un intérêt plus général car il caractérise les échanges pour toute la tranche d'atmosphère comprise entre le sommet de la végétation et le niveau de référence z_r.

Le coefficient d'échange H ou son inverse r_a, apparaissent alors comme une caractéristique du flux pour des conditions atmosphériques données (vitesse du

vent, type de turbulence) et des conditions de surface données (type de culture, rugosité). H est alors un paramètre indispensable à la modélisation des échanges au-dessus d'une culture.

La méthode aérodynamique permet de définir ce coefficient d'échange H. En effet, en régime turbulent et pour des conditions thermiques voisines de la neutralité, le profil de vent au-dessus d'une surface uniforme est donné par la loi logarithmique :

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \cdot \mathrm{Log} \cdot \left(\frac{z + z_o - \mathrm{D}}{z_o}\right) \tag{4}$$

L'ajustement à cette loi de profils de vent expérimentaux, permet une détermination des paramètres de surface u^*, z_o et D.

L'expression du coefficient d'échange H en fonction des paramètres de surface est la suivante :

$$\mathrm{H} = ku^* \cdot \frac{1}{\mathrm{Log}\,\dfrac{z_r - \mathrm{D}}{h - \mathrm{D}}} \tag{5}$$

L'utilisation de la méthode du bilan d'énergie permet la détermination des différents flux d'énergie et de plus, l'emploi simultané de la méthode aérodynamique permet l'analyse et la modélisation des échanges d'énergie au-dessus d'un couvert.

2. — SITE ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les mesures ont été effectuées au Centre Orstom d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire, 5° de latitude nord). Le climat général de la région est de type tropical humide à deux saisons des pluies. Le régime des vents est un régime de brise de mer (vents de secteur S. S.-O.), renforcé en saison des pluies par les alizés et contrarié en période d'harmattan par des vents de secteur N.E.

Le couvert végétal étudié est un gazon (*Paspalum notatum*). Les résultats présentés au cours de cette étude concernent un gazon ayant un développement vertical supérieur à 0,15 m (h_{max} = 0,20 m) ; aussi, les 4 ou 5 jours suivant la coupe (h_{min} = 0,10 m) sont exclus de l'analyse.

La parcelle d'étude de superficie un hectare est irriguée en moyenne tous les 3 ou 4 jours. Les mesures ont eu lieu en saison sèche (janvier-février) pendant la phase diurne de la végétation et elles ont été réalisées sous forme de profils établis sur 30 minutes. Cette durée de 30 minutes correspond sensiblement :

— à une borne supérieure pour des considérations théoriques (régime permanent),

— à une borne inférieure pour des raisons pratiques : résolution de l'évapotranspiromètre pesable et des anémomètres à coupelles utilisés.

a) les mesures de vitesse de vent étaient réalisées avec des anémomètres type Casella ; les tops émis par les capteurs étaient totalisés sur une batterie de compteurs. Le profil de vent était réalisé entre 0 et 6 mètres aux hauteurs suivantes : 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 6 m. La direction du vent était notée à partir d'une girouette appartenant au parc météo voisin.

b) le dispositif utilisé pour la détermination du bilan d'énergie en lui-même était le suivant :

— mesure du rayonnement net par un bilanmètre type Csiro, ventilé et monté à un mètre au-dessus de la culture ;

— mesure du flux de chaleur dans le sol, avec des fluxmètres type Csiro, situés à 0,03 m de profondeur ;

— mesure des gradients de température sèche et humide, avec des thermo-couples Cuivre-Constantan montés dans des psychromètres Assman à ventilation électrique et humectation manuelle toutes les 2-3 minutes. Ces mesures de gradients se faisaient entre

deux niveaux $z_1 = 0{,}30$ m et $z_2 = 1{,}00$ m au-dessus de la culture. La référence de température, utile pour la détermination des températures absolues, était située à deux mètres dans le sol (Tref = 28,7°C ± 0,1°C) ;

c) la mesure directe du flux de vapeur d'eau a été réalisée grâce à un évapotranspiromètre pesable, conçu et réalisé au laboratoire (ELDIN, 1970).

Les données autres que celles concernant l'anémomètrie étaient collectées soit sur un intégrateur pour le rayonnement net, soit sur enregistreur potentiométrique pour l'ensemble des forces électromotrices.

Les données complémentaires de type météorologique proviennent du parc météo situé à une cinquantaine de mètres de la parcelle expérimentale.

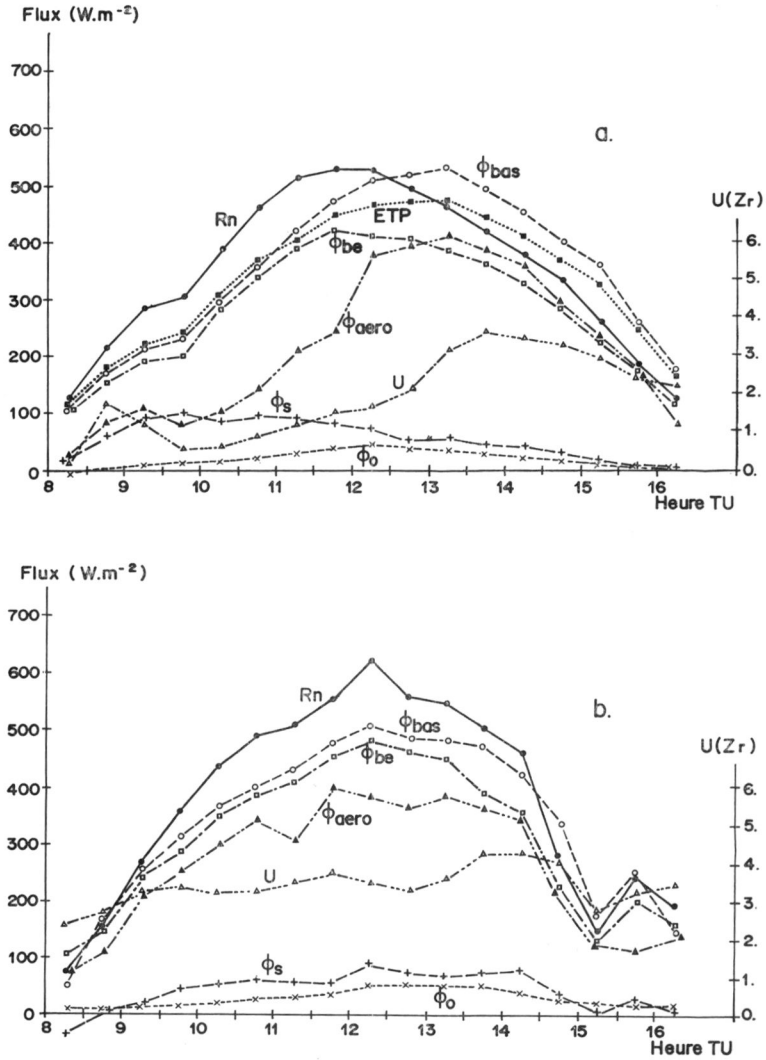


FIG. 1. — *Évolution au cours de la journée des différents flux* Rn, Φ_s, Φ_L, Φ_o, *de la vitesse du vent à 3 mètres et du flux de chaleur latente déterminé par la méthode aérodynamique et par mesure directe :*

a) pour une journée d'harmattan (1-2-1975)
b) pour une journée classique de saison sèche (4-2-1975)

3. — ÉVOLUTION ET ÉTUDE DES DIFFÉRENTS FLUX :

Ordre de grandeur et évolution

Les figures 1 (*a*, *b*) représentent l'évolution au cours de différentes journées du rayonnement net R*n*, du flux de chaleur dans le sol Φ_o, du flux de chaleur sensible Φ_s et du flux de chaleur latente Φ_L déterminé de différentes manières : par la méthode du bilan d'énergie Φ_{BE}, par la méthode aérodynamique Φ_{AERO} et par mesure directe Φ_{BAS}. La figure 2 montre, pour des valeurs intégrées sur la phase diurne de la journée (R*n* positif), l'importance du flux de chaleur latente par rapport aux deux autres flux (chaleur sensible et flux de chaleur dans le sol). La valeur 100 affectée au rayonnement net est arbitraire.

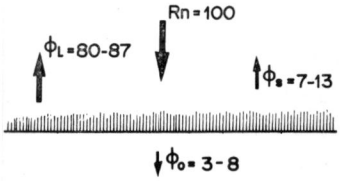


FIG. 2. — *Schéma de répartition de l'énergie selon les différents flux pour un gazon irrigué*

Estimation du flux de chaleur dans le sol

Avant de passer à l'étude plus approfondie du flux de chaleur latente, l'étude de Φ_o, flux de faible importance au point de vue énergétique par rapport au flux de vapeur d'eau, appelle quelques remarques.

Le flux de chaleur dans le sol est étroitement lié au rayonnement net, relation quasi linéaire, mais de plus, il semble être fonction :

— du stade de développement de la culture,

— de l'état hydrique du sol en surface.

Il existe effectivement une tendance à la décroissance du rapport Φ_o/Rn avec le développement de la culture. A cette décroissance générale se superpose une variation en fonction de l'état hydrique de la surface du sol. Sur un sol humide, au lendemain d'une irrigation, le flux de chaleur dans le sol est plus important, et de plus, l'effet de la sécheresse se fait sentir assez vite.

A l'échelle de la journée, sur la période de végétation envisagée et les conditions d'humidité rencontrées, on peut écrire :

$$\Phi_o = -0{,}06\ Rn \qquad (6)$$

Comparaison des différentes techniques mises en œuvre pour la détermination des flux de vapeur d'eau.

Les graphiques 1 (*a*, *b*) montrent, pour deux journées caractéristiques, l'évolution des flux de vapeur d'eau déterminés de trois manières indépendantes :

— Méthode directe par évapotranspiromètre pesable ;

— Méthode du bilan d'énergie ;

— Méthode aérodynamique.

Simultanément, nous avons porté la vitesse du vent à 3 mètres.

Sur l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées, la méthode du bilan d'énergie sera retenue comme méthode de référence pour la détermination de l'ETRM du gazon à l'échelle de la parcelle ; en effet, c'est la seule méthode qui rassemble les deux qualités suivantes :

— fiabilité dans le temps,

— représentativité de conditions pratiques (mode d'irrigation, niveau de la nappe) existant à l'échelle de la parcelle.

La comparaison entre l'évapotranspiromètre et la méthode du bilan d'énergie met en évidence la faiblesse de l'évapotranspiromètre vis-à-vis des deux qualités énoncées précédemment.

Le matin, l'évapotranspiromètre et la méthode du bilan d'énergie semblent bien concorder mais lorsque la vitesse du vent et le déficit de saturation augmentent, le rapport Φ_{BAS}/Φ_{BE} augmente et devient nettement supérieur à 1 (cf. fig. 3).

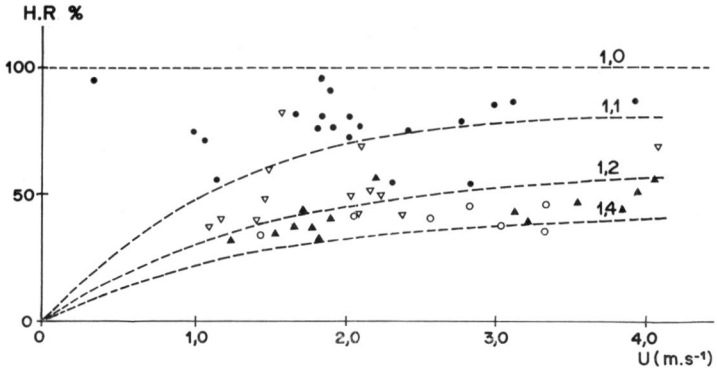


FIG. 3. — *Évolution du rapport Φ_{bas}/Φ_{be} en fonction de l'humidité relative* HR *et de la vitesse du vent à 3 mètres :*

$1{,}0 \leqslant \Phi_{bas}/\Phi_{be} \leqslant 1{,}1$
$1{,}1 \leqslant \Phi_{bas}/\Phi_{be} \leqslant 1{,}2$
$1{,}2 \leqslant \Phi_{bas}/\Phi_{be} \leqslant 1{,}4$
$\Phi_{bas}/\Phi_{be} \geqslant 1{,}4$

Ce phénomène semble être dû à deux effets agissant dans le même sens :

— Du fait de l'existence de conditions hydriques différentes (niveau d'eau dans la bascule à 0,60 m et irrigation tous les jours) entre les deux surfaces de mesure lorsque les conditions climatiques deviennent plus sévères (T_a-T_r plus grand, vitesse de vent plus forte) ex. : journée du 1-2-1975-figure 1 *a*, les réactions des deux surfaces ne seraient pas les mêmes. L'évapotranspiromètre se trouve dans des conditions d'ETRM plus proches de l'évapotranspiration potentielle du gazon définie plus loin et portée sur le graphique 1 *a*.

Ce seul effet ne peut expliquer toute la différence ; en effet, sur la figure 1 *a*, on constate que la valeur du Φ_{BAS} dépasse l'ETP gazon.

— Un effet d'advection très locale au niveau de la bascule qui se surajoute au

phénomène précédent. En effet, l'évapotranspiromètre et l'ensemble de la parcelle, mais surtout la zone directement avoisinante à la bascule, ne sont pas irrigués de la même façon ; cette pratique culturale crée des gradients de température horizontaux favorisant des transferts latéraux d'énergie sur la bascule.

La validité de la méthode aérodynamique est étroitement liée à la valeur de la vitesse du vent : par vent fort ($u_{3\,m}$ = 3-4 m s^{-1}), l'après-midi, en régime de brise de mer, elle donne de bons résultats ; par contre, par vent faible ($u_{3\,m}$ inférieur à 1,5 m s^{-1}), elle est totalement inapplicable même en corrigeant le coefficient d'échange par une fonction du nombre de RICHARDSON, Ri :

$$\mathrm{R}i = \frac{g}{\mathrm{T}} \cdot \frac{\Delta \mathrm{T}/\Delta z}{(\Delta u/\Delta z)^2}$$

où g représente l'accélération de la pesanteur.

LUMLEY et PANOFSKY (1964) propose comme correction du coefficient d'échange :

$$\mathrm{F}(\mathrm{R}i) = 7\ \mathrm{R}i\ (1\text{-}18\ \mathrm{R}i)^{-0,25}$$

Lorsque la correction par une fonction du nombre de Richardson n'est pas suffisante, nous devons nous trouver dans des régimes de convection mixte très voisins de la convection libre ; il faudrait alors utiliser des modes d'exploitation plus élaborés. Par contre, pour les valeurs de vent intermédiaires, une correction du coefficient d'échange par une fonction de Ri devrait permettre une meilleure coïncidence entre Φ_{BE} et Φ_{AERO}.

La méthode aérodynamique, inutilisable par vent faible selon le modèle employé, reste donc d'un emploi limité pour la détermination des flux en zone équatoriale où la vitesse de vent moyenne est faible.

Il est possible d'augmenter la fiabilité de la mesure directe des flux, en prenant de grandes précautions au niveau de la maintenance du dispositif :

— réduction des effets advectifs,

— meilleure définition de la surface évaporante, la végétation du lysimètre ayant tendance à déborder du périmètre. L'influence de ce phénomène est surtout notable pour de petites surfaces évaporantes.

4. — ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES D'ÉCHANGE DU PASPALUM NOTATUM

Nous avons appliqué la méthode aérodynamique, en particulier la loi logarithmique, à l'ensemble de nos profils de vent. L'hypothèse de neutralité thermique étant assez bien vérifiée, car au-dessus d'une culture irriguée, les gradients de température sont faibles et seuls les profils par vent faible s'écarteront des limites admises ; en effet, nous avons dû éliminer les profils pour lesquels la vitesse du vent, à 3 mètres au-dessus de la culture, était inférieure à 1 m s^{-1}, car très souvent ces profils étaient aberrants.

L'exploitation des profils de vent suivant la loi logarithmique a été réalisée numériquement selon une méthode des moindres carrés adaptée et mise au point

par COVEY (1963) et pour laquelle nous avons écrit un programme Fortran-IBM 360. L'ensemble des résultats obtenus sur *Paspalum notatum* est résumé par les figures 4 *a*, *b*, *c*, *d* :

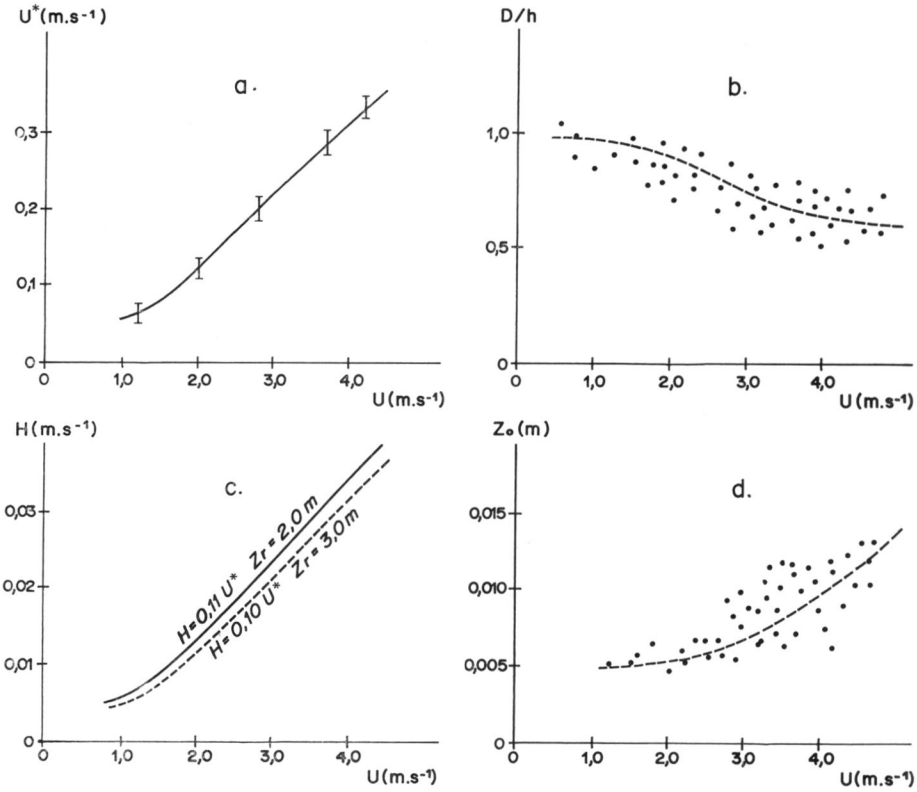


FIG. 4. — *Caractéristiques aérodynamiques d'une culture de* Paspalum notatum :

a) Évolution de la vitesse de frottement avec la vitesse du vent au niveau de référence ;
b) Évolution du coefficient d'échange H avec la vitesse du vent pour deux niveaux de référence $z_r = 3{,}0$ m et $z_r = 2{,}0$ m ;
c) Évolution du paramètre de rugosité z_0 avec la vitesse du vent au niveau de référence ;
d) Évolution du rapport D/*h* en fonction de la vitesse du vent au niveau de référence.

— La vitesse de frottement u^* présente une variation pratiquement linéaire pour des vitesses de vent supérieures à 2 m s^{-1}, avec en outre une courbure pour les faibles vitesses. Ce type de variation est semblable à celui trouvé dans la littérature (PERRIER, 1975) quoique la valeur de u^* *Paspalum* reste toujours inférieure aux valeurs trouvées pour des couverts similaires. La précision sur la vitesse de frottement est de l'ordre de $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ m s^{-1}.

Pour un gazon bien développé et pour des vitesses de vent au niveau de référence comprises entre 1,5 m et 4,5 m s^{-1}, la vitesse de frottement peut être estimée par la formule suivante (cf. fig. 4 *a*) :

$$u^* = 0{,}097\ u(z_r) - 0{,}07$$

— La hauteur de déplacement D, présente une décroissance avec la vitesse du vent (cf. fig. 4 *b*) mais la liaison semble lâche du fait du manque de précision avec laquelle la hauteur de déplacement D est obtenue. Sur l'ensemble de nos profils et en négligeant l'influence de la vitesse du vent, la valeur moyenne de D est de 0,15 m. Diverses formules empiriques donnent des résultats semblables :

STANHILL (1969) : $\text{Log}_{10}\, D = 0{,}9793\, \text{Log}_{10}\, h - 0{,}1536$
Soit pour $h = 0{,}20$ m, $D = 0{,}15$ m

MONTEITH (1973) : $D = 0{,}63\, h$
Soit $D = 0{,}15$ m pour $h = 0{,}20$ m

— Les deux résultats précédents $u^* = f(u)$ et $D_{moyen} = 0{,}15$ m appliqués à la relation (5) définissant H, coefficient d'échange de la culture, permettent d'expliciter la relation $H(u)$ (cf. fig. 4 *a*). Les deux courbes représentent la variation $H(u)$ pour deux niveaux de référence $z_r = 2{,}0$ m et $z_r = 3{,}0$ m.

— La hauteur de rugosité z_o, présente une variation avec la vitesse du vent mais la précision avec laquelle z_o est obtenue ne permet pas de caractériser la fonction $z_o = f(u)$ (cf. fig. 4 *d*). En valeur moyenne, on peut écrire :

$$z_o = 8 \cdot 10^{-3} \pm 9 \cdot 10^{-4} \text{ m.}$$

soit :

$$z_o = 10^{-2} \pm 0{,}1\ 10^{-2} \text{ m.}$$

Cette valeur de z_o apparaît plus faible que les valeurs obtenues par des formules empiriques :

TANNER et PELTON (1960) : $\text{Log } 10\ z_o = 0{,}997 \times h - 0{,}883$
Soit pour $h = 0{,}20$ m, $z_o = 2{,}6 \cdot 10^{-2}$ m

MONTEITH (1973) : $z_o = 0{,}13 \times h$
Soit $z_o = 2{,}6 \cdot 10^{-2}$ m pour $h = 0{,}20$ m

MONTEITH (1973) propose aussi une formule où intervient la structure du couvert par l'intermédiaire de la hauteur de déplacement :

$$z_o = 0{,}35\ (h\text{-D})$$

Soit avec $h = 0{,}20$ m et $D = 0{,}15$ m, $z_o = 1{,}7 \cdot 10^{-2}$ m

cette dernière formule se rapproche nettement plus des valeurs obtenues sur *Paspalum notatum*.

— L'étude aérodynamique précédente a été réalisée sur un gazon présentant un développement important (quelques jours avant la fauche) ; aussi, les diverses relations et valeurs numériques citées ne seront valables et extrapolables que pour des gazons à développement semblable ($0{,}15 < h < 0{,}20$ m).

En conclusion, la détermination de ces paramètres aérodynamiques D, u^*, z_o et surtout l'étude de leurs variations avec la vitesse du vent et le stade de végétation du couvert vont permettre de caractériser le couvert végétal au point de vue des échanges d'énergie. Ces paramètres sont à la base de toute étude analytique des échanges et de leur modélisation ultérieure.

5. — ÉTUDE ANALYTIQUE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE MAXIMALE D'UN GAZON

L'exploitation des résultats obtenus, pour des valeurs instantanées, par la méthode aérodynamique d'une part et du bilan d'énergie d'autre part, va nous permettre l'étude de l'influence des différents facteurs climatiques sur l'évapotranspiration d'un gazon ; au préalable, il fallait se définir un modèle théorique d'évapotranspiration.

Choix d'un modèle d'évapotranspiration potentielle

PERRIER (1975) propose deux modèles d'évapotranspiration potentielle :

— un modèle ETP_o, ne faisant intervenir qu'une résistance à la diffusion r_a, dite résistance atmosphérique. Ce modèle correspond à une surface à saturation sans développement vertical. Ce modèle conduit à une formule du type PENMAN :

$$ETP_o = \frac{P'}{P' + \gamma}(Rn + \Phi_o) + \frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a \qquad (7)$$

E_a étant défini comme suit :

$$E_a = \frac{LM}{RT} \cdot P' \cdot H(T_a - T_r) \qquad (7\ bis)$$

avec H = coefficient d'échange obtenu à partir d'une mesure de vent au niveau z_r et de la relation présentée sur la figure 4 *c*.

— un modèle ETP plus complexe à deux résistances, r_a et r_o, correspondant au cas d'une structure à développement vertical et dont toutes les surfaces sont à saturation ; r_o traduisant l'effet de la structure de la surface sur la diffusion de l'eau.

L'expression de ETP est alors :

$$ETP = \frac{ETP_o}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_o}{r_a}} \qquad (8)$$

avec ETP_o, défini comme précédemment.

Selon PERRIER (1975), la résistance de structure d'un gazon serait comprise entre 0 et 5 s m^{-1}. La valeur de r_o déterminant le choix de l'un ou l'autre des modèles d'évapotranspiration, nous nous proposons de déterminer cette résistance de structure r_o. Nous avons, lorsque toutes les surfaces du gazon sont à saturation (rosée, après pluie), d'une part calculé la valeur de ETP_o par la formule de PENMAN (7), et d'autre part, retenu les valeurs correspondantes du flux de chaleur latente mesuré par la méthode du bilan d'énergie, soit ETP.

Il est alors possible, à partir des équations 7 et 8 d'expliciter r_o, sur 8 profils retenus (5 avec rosé, 3 après pluie) ; les résultats sont les suivants :

$$r_o = 2{,}5 \pm 4{,}0 \text{ s m}^{-1}$$

ce qui, compte tenu de la dispersion, ne nous permet pas de dire que r_o est différent de zéro. Il faut tout de même signaler que les profils retenus avec la rosée sont à l'origine de la grande dispersion, car effectivement, l'on travaille avec des flux faibles et donc une précision faible. Si l'on retenait les profils obtenus après la pluie, réalisés de 11 h 30 à 12 h 30, la valeur de r_o deviendrait significativement différente de zéro.

Vu la précision de notre dispositif de mesure, il semble raisonnable de choisir un modèle d'ETP à une seule résistance r_a.

Etude analytique de l'évapotranspiration réelle maximale d'un gazon

L'évapotranspiration potentielle $ETP_o(r_o = 0)$ peut être considérée comme un paramètre climatique de référence, au r_a près. Mais pratiquement, si l'on veut rendre compte de l'évapotranspiration d'une culture pour l'ensemble des conditions climatiques rencontrées, il faut parler d'évapotranspiration réelle et compléter le modèle précédent par l'introduction d'une nouvelle résistance r_s (PERRIER, 1975).

L'évaporation réelle, dans le cas où r_o est nulle, s'écrit comme précédemment :

$$ETR = \frac{ETP_o}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_s}{r_a}} \qquad (9)$$

Dans le cadre de cette étude, nous avons travaillé sur un gazon irrigué régulièrement pour lequel l'alimentation en eau de la culture était sensiblement la même au cours de l'expérience. Cette alimentation étant la moins limitante possible, nous parlerons d'évapotranspiration réelle maximale ETRM.

Variation journalière de la résistance stomatique

La figure 5 *a* représente la variation au cours de la journée de la résistance stomatique r_s et de la résistance critique r_c, r_c étant définie comme la résistance stomatique qui correspondrait à une ETR égale au terme radiatif $\frac{P'}{P' + \gamma}(Rn + \Phi_o)$ de l'équation de PENMAN, soit ;

$$r_c = \frac{LM}{RT} \cdot \frac{(T_a - T_r)}{(Rn + \Phi_o)} \cdot (P' + \gamma)$$

DAUDET et PERRIER (1966) ont montré par ailleurs, l'intérêt de cette résistance.

La résistance stomatique est calculée à partir de la relation 9 :

$$r_s = \frac{P' + \gamma}{\gamma} \left[\frac{ETP_o}{ETRM} - 1 \right] \cdot r_a$$

Dans le cadre de cette analyse, le flux de chaleur latente déterminé par la méthode du bilan d'énergie Φ_{BE} a été retenu comme valeur de ETRM. Les valeurs et les dispersions portées sur le graphique correspondent à 8 journées de mesures.

On constate que :

— r_c varie au cours de la journée : elle est minimale en milieu de journée (Rn maxi), et maximale le matin et le soir (Rn de l'ordre de zéro).

— Lorsqu'il n'y a pas de rosée (courbe en pointillés), la végétation présente le matin une fermeture stomatique ; vers 10 heures TU, il y a une ouverture stomatique qui est très probablement d'origine photique. La courbe pleine le matin, représente plusieurs journées avec rosée ; dans ce cas, le gazon évapore pratiquement comme si la résistance stomatique était nulle ; par ailleurs, il y a régulation stomatique vers 13 heures et qui va en augmentant vers le soir.

— r_s est toujours inférieure à la résistance critique ; pratiquement, l'évapotranspiration augmentera avec la vitesse du vent et ceci aux dépens du flux de chaleur sensible (PERRIER *et al.*, 1975).

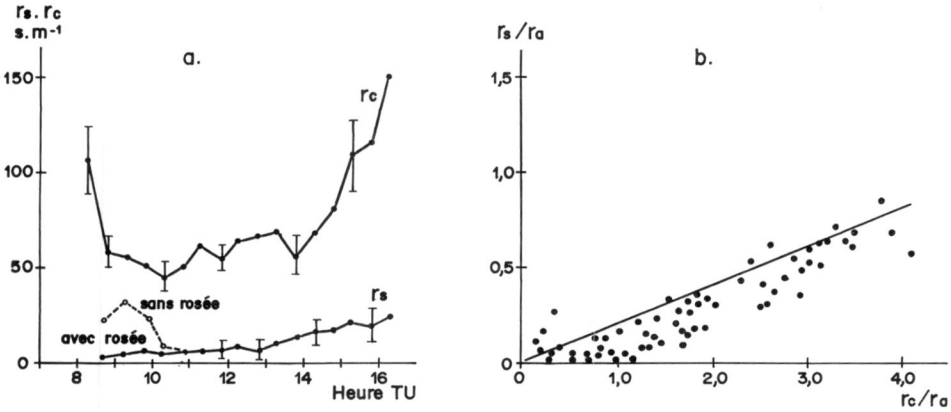


FIG. 5. — *Résistances caractéristiques du couvert*

a) Évolution au cours de la journée des résistances critiques r_c et stomatiques r_s du couvert (moyenne sur 8 journées de mesure)
b) Évolution du rapport r_s/r_a en fonction du rapport r_c/r_a

Au niveau de l'interprétation des variations de l'ETRM, ce n'est pas r_s en elle-même qui est intéressante mais la valeur du rapport $\frac{r_s}{r_a}$; en effet, suivant la relation (8), nous avons :

$$\mathrm{ETRM} = f\left(\mathrm{R}n + \Phi_o, \mathrm{E}a, \frac{r_s}{r_a}\right)$$

Compte tenu, d'une part, des variations de r_s au cours de la journée mises en évidence sur le graphique et d'autre part, de l'évolution journalière de r_a liée à la vitesse du vent, il semble intéressant de corréler le rapport $\frac{r_s}{r_a}$ aux différents paramètres climatiques Rn, $\mathrm{T}_a - \mathrm{T}_r$, u, soit chercher une relation :

$$\frac{r_s}{r_a} = f(\mathrm{R}n + \Phi_o, \mathrm{T}_a - \mathrm{T}_r, u)$$

Dans un premier temps, il est possible de regrouper ces paramètres en un seul, plus synthétique, qui peut être le rapport r_c/r_a.
En effet :

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{E_a}{Rn + \Phi_o} \cdot \frac{P' + \gamma}{P'}$$

La figure 5 *b* représente la variation du rapport $\frac{r_s}{r_a}$ en fonction de r_c/r_a.

En première approximation, $\frac{r_s}{r_a}$ peut être ajusté à la relation :

$$\frac{r_s}{r_a} = 0{,}18 \frac{r_c}{r_a} = 0{,}239 \frac{E_a}{Rn + \Phi_o}$$

La relation (9) prend alors la forme :

$$ETRM = f'(Rn + \Phi_o, E_a)$$

Soit en explicitant $f'(Rn + \Phi_o, E_a)$:

$$ETRM = \frac{\frac{P'}{P' + \gamma}(Rn + \Phi_o) + \frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a}{1 + 0{,}239 \cdot \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{E_a}{Rn + \Phi_o}} \qquad (9\,a)$$

La figure 6 représente, en fonction de $\frac{P'}{P' + \gamma}(Rn + \Phi_o)$, deux types de résultats :

— ETRM calculées suivant la formule 9 *a* pour différentes valeurs de E_a (E_a = 0, 100, 200, 500, 1 000 W m^{-2}) : ce sont les courbes en pointillés. La courbe A représente l'enveloppe des ETRM calculées pour les conditions expérimentales rencontrées et caractérisées par :

$$\frac{r_c}{r_a} \text{ maxi} = 4{,}2$$

soit

$$E_{a\,\text{maxi}} = 3{,}15\,(Rn + \Phi_o) \qquad (9\,b)$$

— les valeurs expérimentales de ETRM obtenues par la méthode du bilan d'énergie et les différentes droites de régression (courbes pleines) calculées à partir de ces données.

Il existe une bonne concordance entre les deux résultats : *primo*, la dispersion expérimentale correspond sensiblement à la dispersion prévue par les relations 9 *a* et 9 *b* ; *secundo*, les valeurs obtenues par temps d'harmattan (E_a fort) se placent dans la zone supérieure du nuage de points et celles obtenues par temps humide (E_a faible) se situent au voisinage de $\frac{P'}{P' + \gamma}(Rn + \Phi_o)$.

La détermination de l'ETRM à partir du modèle défini par la relation 9 *a* nécessite, d'une part la connaissance de $(Rn + \Phi_o)$ et d'autre part de E_a. Or E_a, est un paramètre difficile à déterminer en pratique ; aussi, il serait intéressant de pouvoir l'estimer à partir d'une mesure plus simple.

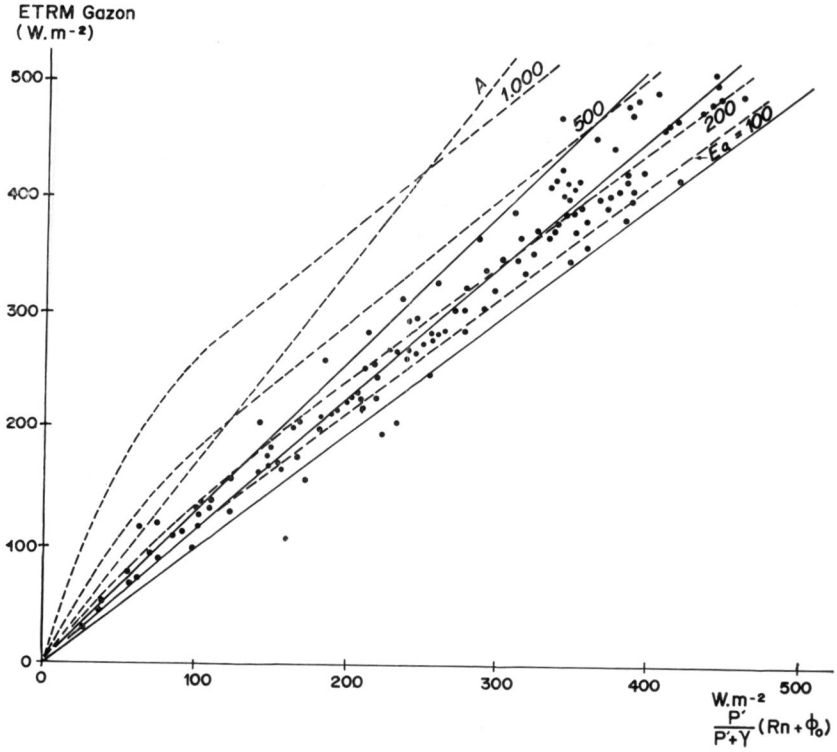


FIG. 6. — *Évolution de l'*ETRM *instantanée du* Paspalum notatum *en fonction du terme radiatif de l'*ETP *Penman*

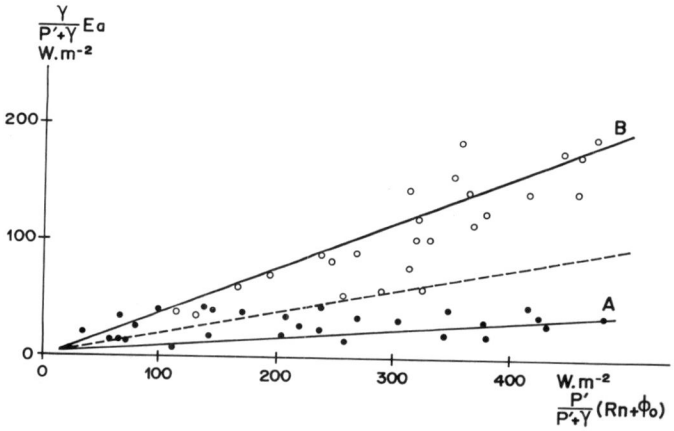


FIG. 7. — *Évolution pour des valeurs instantanées du terme convectif* $\frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a$ *en fonction du terme radiatif de l'*ETP *Penman pour deux types de masse d'air :*

B : masse d'air sec saharienne
A : masse d'air humide océanique

La figure 7 montre la variation du terme convectif $\frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a$ en fonction du terme radiatif $\frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_o)$ de la formule de PENMAN. Il existe une relation entre ces deux facteurs, mais il y a aussi une seconde source de variation caractérisée sur la figure par les droites A et B : la masse d'air, A représentant la masse d'air humide, et B, la masse d'air sec (harmattan).

D'où $$E_a = f(Rn, \text{Masse d'air})$$

En première approximation, pour une masse d'air donnée, il est possible d'estimer E_a à partir d'une relation linéaire du rayonnement net. Nous avons obtenu :

$$\frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a = k_1 \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_o)$$

Les valeurs de k_1 étant :

masse d'air humide	$0 < k_1 < 0{,}07$
masse d'air sec	$k_1 = 0{,}35$
valeur moyenne	$k_1 = 0{,}20$

Appliquons la relation linéaire $E_a = f(Rn + \Phi_o)$ ci-dessus au modèle d'ETRM défini par l'équation 9 *a*.

Soit :

$$\text{ETRM} = k \frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_o) \qquad (10)$$

le coefficient k caractérisant la masse d'air en présence au niveau du site de mesure.

Les valeurs expérimentales du coefficient k, pour le site d'Adiopodoumé, sont les suivantes :

— masse d'air sec (Harmattan) $k = 1{,}25$
— masse d'air humide $k = 0{,}98$
— valeur moyenne pour la période de mesure $k = 1{,}10$

La valeur 0,98 obtenue avec une masse d'air humide n'est pas statistiquement différente de 1,00.

PRIESTLEY et TAYLOR (1972) citent des valeurs de k obtenues sous différentes conditions :

Wangara Data : $k = 1{,}33 \pm 0{,}21$
Fluxatron Measurements (Dyer) : $k = 1{,}08 \pm 0{,}01$
University of Wisconsin : $k = 1{,}30 \pm 0{,}03$
Csiro lysimeters : $k = 1{,}34 \pm 0{,}05$

Les valeurs obtenues en basse Côte d'Ivoire se situent dans cet éventail de données. Une relation linéaire du type $\text{ETRM} = k \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (Rn + \Phi_o)$ présente un intérêt certain en Côte d'Ivoire où seules, deux masses d'air (donc 2 coefficients k) sont en présence ; la linéarité de la relation étant intéressante pour l'intégration dans le temps.

6. — DÉTERMINATION PRATIQUE DE LA CONSOMMATION EN EAU DU PASPALUM NOTATUM EN CÔTE D'IVOIRE

En pratique, de nombreux auteurs (PENMAN, TURC, BROCHET et GERBIER) ont proposé pour des échelles de temps du mois ou de la décade des formules du type :

$$\mathrm{ETRM} = k\mathrm{R}g + b$$
$$\mathrm{ETRM} = k\mathrm{R}g + b \text{ Piche}$$

Ces différentes formules sont des adaptations de la formule théorique de PENMAN (éq. 7) à des échelles de temps utilisées pratiquement. Nous allons procéder à cette adaptation à partir de la formule d'ETRM définie au paragraphe précédent :

$$\mathrm{ETRM} = k' \frac{\mathrm{P}'}{\mathrm{P}' + \gamma} (\mathrm{R}n + \Phi_o) \qquad (10)$$

Compte tenu de la relation linéaire existant entre ETRM et $(\mathrm{R}n + \Phi_o)$ pour une masse d'air donnée, l'intégration dans le temps de cette relation donnera une relation linéaire de même type.

Aussi, lorsque pour des bases de temps de la journée, de la décade et du mois, les données de rayonnement net et de flux de chaleur échangé par conduction avec le sol sont disponibles, la relation (10) donnera la meilleure estimation de ETRM gazon (les valeurs du coefficient k' seront explicitées dans la suite du texte). Mais la relation (10) renferme deux termes qui ne sont pas couramment mesurés : $\mathrm{R}n$ et Φ_o ; aussi, nous avons dû estimer le rayonnement net à partir d'une mesure plus simple : le rayonnement global $\mathrm{R}g$.

Les résultats pour Adiopodoumé sont les suivants (MONTENY et GOSSE, 1975) (cf. figure 8) :

$$\mathrm{R}n = 0{,}803\ \mathrm{R}g - 25$$

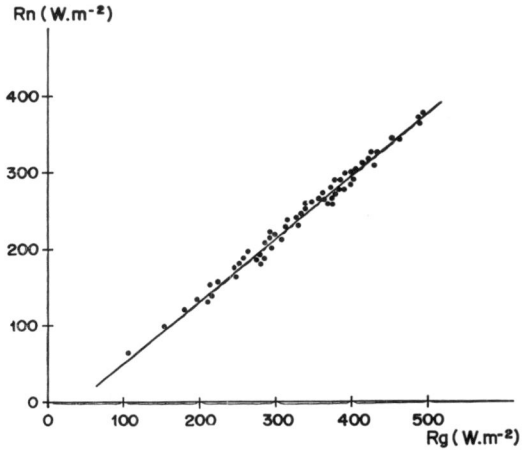


FIG. 8. — *Phase diurne du rayonnement net d'un gazon en fonction du rayonnement global à Adiopodoumé*

Les valeurs de rayonnement net correspondent à la phase diurne de ce dernier. La précision de cette relation est très bonne (coefficient de corrélation $r = 0{,}987$) et cette estimation n'introduira aucune perturbation dans le modèle ; de plus, au paragraphe 3 *b*, nous avions trouvé qu'à l'échelle de la journée :

$$\Phi_o = -0{,}06\ Rn$$

D'où

$$Rn + \Phi_o = 0{,}755\ Rg - 23{,}5$$

Soit

$$ETR_M = k' \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (0{,}755\ Rg - 23{,}5) \qquad (11)$$

expression dans laquelle le coefficient k' intégre deux variables :

1° Le rapport r_s/r_a dont nous avons défini la loi de variation au paragraphe précédent en fonction de r_c/r_a pour l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées pendant l'expérience. Pour la suite de l'étude, nous adopterons comme hypothèse que ce rapport suit la même loi au cours de l'année, ce qui pratiquement équivaut à dire que le gazon, dans les conditions rencontrées en basse Côte d'Ivoire, ne connaît pas de phase de repos végétatif.

2° La liaison existant entre le terme convectif E_a et le terme radiatif Rn pour une masse d'air donnée.

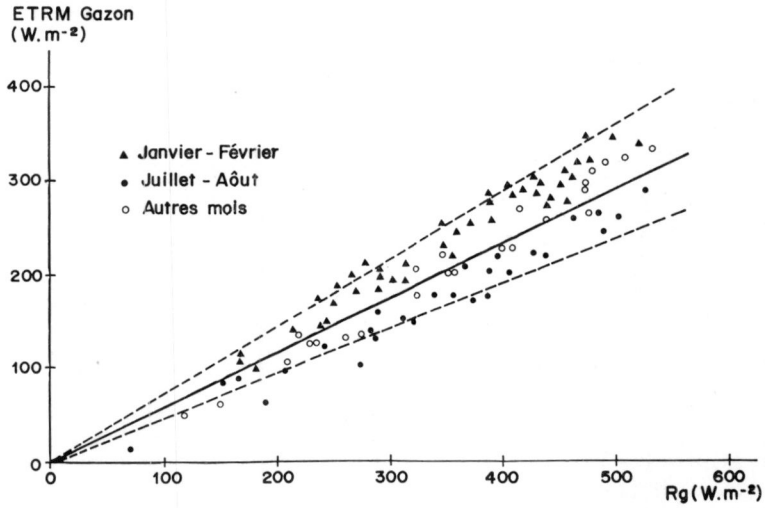


FIG. 9. — *Évolution de l'*ETRM *journalière du* Paspalum notatum *en fonction du rayonnement global*

Avec l'hypothèse adoptée précédemment, les variations de k' seront donc liées au déficit de saturation ($T_a - T_r$) qui caractérise la masse d'air. En effet, comme le montre la figure 9, les journées de janvier (air sec saharien) sont au-dessus de l'ensemble des données alors que les journées de saison des pluies (juillet) sont à la limite inférieure. Compte tenu de la valeur moyenne de $\frac{P'}{P' + \gamma}$ égale à 0,75, le

coefficient k' prend les valeurs extrêmes et moyennes suivantes pour des valeurs journalières de ETRM et Rg :

$$k'_{\text{maxi}} = 1{,}27$$
$$k'_{\text{mini}} = 1{,}06$$
$$k'_{\text{moyen}} = 0{,}91$$

Le coefficient $k'_{\text{mini}} = 0{,}91$, inférieur aux valeurs attendues, semblerait montrer que l'hypothèse concernant le rapport r_s/r_a n'est pas strictement vérifiée en pleine saison des pluies.

Sur une période de temps de l'ordre du mois, il est possible de préconiser la relation (11) avec un coefficient k', correspondant au k'_{moyen} journalier $= 1{,}06$. En effet, nous avons appliqué la relation (11) avec $k' = 1{,}06$ aux valeurs moyennes du rayonnement global d'Adiopodoumé et nous avons comparé l'ETRM ainsi calculée à l'évapotranspiration calculée selon TURC (1961) et à la mesure par évapotranspiromètre pesable (cf. fig. 10). Il existe une bonne concordance entre les trois manières d'estimer l'ETRM gazon (l'ETP au sens de TURC pouvant être considérée comme l'ETRM gazon).

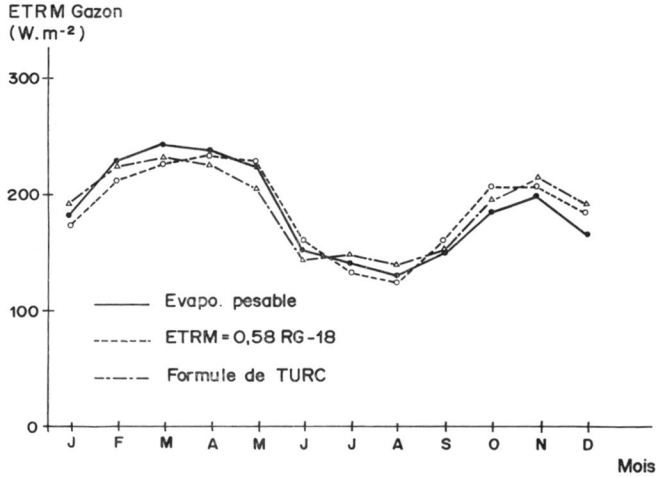


FIG. 10. — *Comparaison de l'*ETRM *mensuelle du gazon déterminé de différentes manières :*
mesurée à l'évapotranspiromètre pesable
estimée par la formule de TURC
estimée par la formule ETRM = 0,58 Rg — 18

Pour la décade et le mois, il est possible, compte tenu de la précision requise au niveau de certaines applications agronomiques, de se contenter d'une estimation du rayonnement global à partir d'une corrélation entre le rayonnement global et la durée d'insolation :

$$\frac{Rg}{I_{ga}} = a + b\,\frac{S}{S_{\text{maxi}}}.$$

Cette formule (relation 11) donnant l'évapotranspiration réelle maximale d'un gazon établie pour un lieu donné, peut être étendue à l'ensemble de la Côte d'Ivoire, en ayant au préalable, réalisé trois études :

— étude de la liaison existant entre le rapport r_s/r_a et les paramètres climatiques (Rn, $T_a - T_r$, u),

— étude de la relation $E_a = f$ (Rn, masse d'air),
— étude de la relation R$n = f$ (Rg).

Ces études sont nécessaires pour ajuster les différents coefficients. Dans le cas précis de la Côte d'Ivoire, elles devront être réalisées selon un axe Nord-Sud.

CONCLUSION

L'ETRM du gazon est encore considérée comme valeur de référence pour l'évapotranspiration ; aussi, une bonne connaissance de son déterminisme, donnée par des études analytiques, permet d'en mieux analyser les variations et d'en prévoir l'évolution dans le temps et l'espace. Il semble, malgré tout, qu'elle puisse avoir un intérêt plus général ; en effet, selon PERRIER, il semblerait qu'en climat humide (E_a faible) et à vitesse de vent égale, lors du passage d'un gazon à une culture haute classique (Panicum,Maïs...), le poids des résistances r_o et r_s serait prépondérant et alors :

$$\text{ETRM}_{\text{culture haute}} \leqslant \text{ETRM}_{\text{gazon}}$$

L'ETRM gazon peut alors être considérée comme l'enveloppe des ETRM des cultures hautes. Dans certains cas, cette borne supérieure de la consommation en eau est suffisante pour l'utilisateur mais il est bien évident qu'il faudra essayer d'approcher au plus près l'ETR de la culture lorsque le facteur réserve en eau va devenir limitant (ex. zone sahelienne).

Par ailleurs, cette étude nous a permis de mettre en évidence l'importance des phénomènes radiatifs dans l'évapotranspiration. Il apparaît donc préférable et surtout plus aisé de maintenir en réseau des mesures de rayonnement net ou global dans le cas où la relation entre Rg et Rn est bonne plutôt que des mesures avec évapotranspiromètres qui s'avèrent peu fiables à l'usage.

Il faut souligner, en plus, l'importance de l'étude de l'évolution du rapport r_s/r_a au cours du développement de la végétation, car il permet, d'une part, de suivre l'évolution du rapport ETR/ETRM et d'autre part de définir les stades critiques de la culture.

Reçu pour publication en avril 1976.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement le personnel de la Station de Bioclimatologie de l'I.N.R.A. (C.N.R.A., Versailles) et plus précisément M. PERRIER dont les nombreux conseils et suggestions nous ont permis de réaliser ce travail.

SUMMARY

EVAPOTRANSPIRATION AND AERODYNAMIC PARAMETERS OF A LAWN IN AN EQUATORIAL HUMID COUNTRY

The energy balance method is used to determine the different energy fluxes (sensible and latent) above a lawn in an equatorial humid country. The latent heat flux measured by different methods are compared. The simultaneous use of the energy budget and aerodynamic methods

enables an explanation of the variations in the latent heat flux in termes of a changing resistance. The importance of the net radiation in this process is stressed. Formulas giving the maximum actual evapotranspiration for daily and monthly periods are given.

ZUSAMMENFASSUNG

EVAPOTRANSPIRATION UND AUSTAUSCHEIGENSCHAFTEN EINES RASENS UNTER FEUCHTEM ÄQUATORIALKLIMA

Die Methode der Energiebilanz ist gebraucht, um die verschiedenen (wahrnehmbaren und latenten) Energieströme an einem Rasen in äquatorialer Umwelt zu bestimmen. Daneben wurde der so erzielte latente Wärmestrom mit den durch andere Techniken erzielten Strömen verglichen. Der gleichzeitige Gebrauch der Energiebilanzmethode und der Aerodynamikmethode erlaubte, die Schwankungen des latenten Wärmestroms als Widerstände zu erklären und die Bedeutung der Strahlungserscheinungen klarzustellen. Formeln, die die maximale tatsächliche Evapotranspiration eines Rasens liefern, werden für tägliche und monatliche Zeitabschnitte vergestellt.

РЕЗЮМЕ

Эвапотранспирация и характерности обмена происходящего в газоне во влажном экваториальном климате.

Г. ГОСС.

Метод баланса энергии применялся для определения разных потоков энергии (чувствительной и латентной) на уровне газона в экваториальной среде. Кроме того, латентный поток тепла, полученный таким образом, сравнивался с потоками получеными с помощью других технологий. Совместное применение аэродинамического метода и метода баланса энергии, позволило об'яснить в терминах устойчивости, изменения латентного потока тепла, и выявить важность явлений излучения. Предлагаются формулы реальной максимальной эвапотранспирации, выведенные на базе одного дня и одного месяца.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Covey W., 1963. A method for the computation of logarithmic wind profile parameters and their standard errors. In « *The energy budget at the earth's surface* », 28-32.

Daudet F. A., Perrier A., 1968. Étude de l'évaporation ou de la condensation à la surface d'un corps à partir du bilan énergétique. *Rev. Gen. Thermique*, **7**, 76, 353-364.

Eldin M., 1970. Évapotranspiromètre à bascule mécanique enregistreuse. In *Technique d'étude des facteurs physiques de la biosphère*. 273-279, I.N.R.A., Édit. Paris.

Lumley, Panofsky, 1964. *The structure of turbulence*. New York Interscience Édit., 239 p.

Monteny B., Gosse G., 1975. Analyse et estimation du rayonnement net d'une culture de *Panicum* maximum en zone subtropicale humide. *Œcologia Plantarum* sous presse.

Perrier A., 1975. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. L'évaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles. *Ann. agron.*, **26** (1), 1-18. II. Expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface mince. *Ann. agron.* III. Évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. agron.*, **26** (3), 229-243.

PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J.-M., BLANCO DE PABLOS, 1975. Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application. *Ann. agron.*, **26** (1), 19-40.

PERRIER A., SEGUIN B., 1970. Méthodes et techniques de détermination des coefficients de transferts et des flux dans l'air. In *Technique d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, 425-445. I.N.R.A., Édit. Paris.

PRIESTLEY C. M. B., TAYLOR R. J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly weather Review*, **100** (2), 81-92.

TANNER C. B., PELTON W. L., 1960. Potential evapotranspiration estimate by the approximate energy balance method of PENMAN. *J. Geophys., Res.*, **65**, 3391-3413.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12**, 13-49.

Ann. agron., 1976, **27** (2), 165-182.

MESURE DES FLUX PROFONDS DE DRAINAGE OU DE REMONTÉES CAPILLAIRES LEUR IMPORTANCE DANS LE BILAN HYDRIQUE

F. A. DAUDET et Ch. VALANCOGNE
avec la collaboration technique de A. FOUÉRÉ

Laboratoire de la Chaire de Bioclimatologie et d'Écologie,
Institut national agronomique, Paris-Grignon, I. N. R. A.,
75231 Paris Cedex 05

RÉSUMÉ

Dans l'évaluation du bilan hydrique, les flux verticaux de drainage ou de remontées capillaires en profondeur sont généralement négligés. Cela conduit dans certains cas à des erreurs importantes sur l'estimation de la consommation en eau par évapotranspiration.

La détermination, par des méthodes indépendantes, de l'évapotranspiration (évapotranspiromètre pesable de grande profondeur) et des variations de stock d'eau du sol (humidimètre à neutrons), permet de calculer ces flux verticaux profonds, sur des périodes de l'ordre de vingt jours.

On montre que dans les conditions particulières d'un limon profond et pour une culture de maïs, les remontées capillaires à 1,50 m de profondeur peuvent, l'été, fournir une part importante de l'eau consommée par évapotranspiration.

Enfin, une méthode d'évaluation de ces flux à l'échelle journalière par application de la loi de Darcy généralisée est proposée. Elle suppose des relevés tensiométriques en profondeur et un étalonnage préalable du sol pour connaître la conductivité hydraulique à la profondeur envisagée et sa variation avec le potentiel matriciel. Les résultats obtenus au cours d'une étude préliminaire de cette méthode sont présentés.

I. — INTRODUCTION

La détermination des différents termes du bilan hydrique à l'aide de mesures d'humidité du sol et de la pluviométrie est très fréquemment pratiquée dans les expérimentations. Depuis le développement de l'humidimètre à neutrons en particulier, un grand nombre de bilans ont pu être faits de cette façon.

La méthode cependant achoppe sur un point qui, dans certains cas, peut devenir extrêmement critique : l'existence de flux verticaux plus ou moins importants à la base des différents profils hydriques mesurés au cours du temps.

En effet, le bilan hydrique d'une tranche de sol d'épaisseur z pendant une période quelconque, doit s'écrire en toute rigueur :

$$[\Delta S]_o^z = P - ETR \pm r - D ; \quad (1)$$

$[\Delta S]_o^z$ = variation du stock d'eau du sol dans la tranche (o, z) ;
P = pluviométrie ;
ETR = évapotranspiration réelle ;
r = ruissellement ;
D = drainage ou remontées capillaires à la profondeur z.

Dans cette équation, on ne sait mesurer facilement que les termes P (pluviométrie) et $[\Delta S]_o^z$ (humidimètre à neutrons par exemple). On est ainsi conduit à évaluer ETR à l'aide d'une expression tronquée du bilan hydrique :

$$ETR = P - [\Delta S]_o^z \quad (2)$$

Cela revient à admettre que les termes r et D de l'équation (1) sont constamment négligeables.

Dans la plupart des cas, on pourra négliger le terme de ruissellement r. Toutefois, certaines situations défavorables (terrains inclinés, pluies violentes, mauvaise perméabilité du sol, ...) ne permettront pas de faire une telle approximation ; on pourra alors tenter de mesurer ce ruissellement à l'aide de dispositifs appropriés (WARD, 1967). Il paraît beaucoup plus difficile d'apprécier l'importance du terme D.

La plupart des expérimentateurs conscients de ce problème tentent d'y remédier en mesurant les profils hydriques sur des tranches de sol suffisamment épaisses, pouvant atteindre trois mètres. Les teneurs en eau à cette profondeur sont en effet très stables au cours du temps, ce qui incite à penser que les flux y sont le plus souvent faibles et que l'erreur commise en les négligeant est insignifiante. Il n'en reste pas moins qu'en période pluvieuse, le drainage peut devenir un élément important du bilan hydrique et que, par ailleurs, rien ne permet d'affirmer que des variations très faibles d'humidité à une profondeur donnée traduisent nécessairement des flux presque nuls (ROSE et STERN, 1967).

D'un point de vue pratique, il est relativement long et difficile, voire même impossible, si le sous-sol comporte un lit de cailloux, d'établir le profil hydrique du sol sur des épaisseurs aussi importantes. On voit donc l'intérêt qu'il y aurait à disposer d'une méthode permettant de mesurer directement les flux hydriques à une profondeur de l'ordre de 1,50 m par exemple. Outre le bilan hydrique dont la mesure serait considérablement simplifiée puisqu'il suffirait d'établir les profils sur cette profondeur pour « boucler » le bilan, de nombreux problèmes agronomiques (lessivage des éléments fertilisants, accumulations salines, dispersion de polluants, ...) ou hydrologiques (bilan des nappes souterraines, pollution, ...), pourraient être étudiés avec beaucoup plus de facilité si une telle mesure existait.

Dans ce but, certains auteurs (CARY, 1968) ont tenté de construire des fluxmètres hydrauliques conçus selon un principe analogue à celui des fluxmètres thermiques. Il semble que cette tentative n'ait pas abouti à une mise au point satisfaisante.

On verra dans la suite de l'article que si l'on dispose d'une mesure suffisamment fiable de l'évapotranspiration réelle ETR d'une culture et si, par ailleurs, on déter-

mine les variations de stock d'eau du sol, le terme de drainage ou de remontée capillaire à une profondeur quelconque peut être calculé.

Nous présentons ici quelques résultats de mesure de flux obtenus de cette façon au cours de l'année 1974, et nous examinerons à titre exploratoire la possibilité de calculer ces mêmes flux à partir de mesures tensiométriques en appliquant la loi de Darcy généralisée.

II. — DÉFINITIONS ET PRINCIPES DE MESURE DES FLUX DANS LE SOL

1. — *Définitions*

Il est d'usage courant d'exprimer en millimètres les entrées et les sorties d'eau du sol (pluie, évapotranspiration, drainage, ...). Rappelons que ces grandeurs représentent un volume d'eau par unité de surface de sol horizontal :

$$1 \text{ mm} = 1 \text{ l/m}^2 = 10 \text{ m}^3\text{/ha}$$

Le terme de flux que nous employons ici exprime la vitesse des phénomènes considérés (drainage, remontées capillaires, ...) et fait donc intervenir le temps pendant lequel ils se déroulent. Ces flux seront notés φ_z et mesurés en mm/jour, l'indice z représentant la profondeur considérée dans le sol.

Les flux cumulés sur des périodes (t_1, t_2) plus ou moins longues seront notés Φ_z et exprimés en mm. On a donc :

$$\Phi_z = \int_{t_1}^{t_2} \varphi_z(t)dt \tag{3}$$

2. — *Principes mis en œuvre pour la détermination des flux d'eau dans le sol*

a) *Détermination du flux Φ_z à partir du bilan hydrique :*

Soit Φ_o le flux d'eau cumulé sur une période de temps donnée, qui a traversé la surface du sol. En l'absence de ruissellement :

$$\Phi_o = \text{P} - \text{ETR} \; ;$$

P = pluviométrie de la période ;

ETR = évapotranspiration réelle pendant la période.

Le principe de la conservation de la masse d'eau permet d'écrire, quelle que soit la profondeur z considérée :

$$\Phi_z = \Phi_o - [\Delta S]_o^z \tag{4}$$

$[\Delta S]_o^z$ = variation du stock d'eau de sol contenu dans la tranche (o, z).

Cette équation montre comment la mesure du flux Φ_z qui nous intéresse, peut résulter de la connaissance simultanée des termes Φ_o et $[\Delta S]_o^z$. Il est important de remarquer que le flux ainsi déterminé est le flux total qui transite dans le système sol-racines à un niveau z donné.

D'un point de vue pratique, Φ_o peut être mesuré à l'aide d'un lysimètre pesable de grande profondeur (de l'ordre de 2 m) et $[\Delta S]_o^z$ peut être déterminé à intervalle de temps régulier à l'aide d'un humidimètre à neutrons.

b) *Détermination du flux Φ_z à partir du gradient de potentiel hydrique.*

La loi de DARCY généralisée exprime le flux instantané $\varphi(z, t)$ qui traverse le plan de profondeur z sous la forme :

$$\varphi(z, t) = - K_z(\Psi m) \frac{d\Psi t}{dz} \tag{5}$$

$K_z(\Psi m)$ = conductivité hydraulique du sol à la profondeur z (fonction du potentiel matriciel Ψm)

$\frac{d\Psi t}{dz}$ = gradient de potentiel hydrique total à la même profondeur.

Dans la suite, nous exprimerons les potentiels en centimètres d'eau, et la conductivité hydraulique dans la même unité que les flux, soit en millimètres par jour.

Notons immédiatement que cette loi ne peut être envisagée que pour décrire les flux dans la zone de sol non prospectée par les racines.

La mesure du flux instantané $\varphi(z, t)$ par application de cette loi suppose donc que soient connus :

— la conductivité hydraulique du sol $K_z(\Psi m)$ qui dépend très fortement de sa teneur en eau ;

— le gradient de potentiel hydrique total.

On voit que, si une étude préliminaire du sol permet d'établir une relation $K(\Psi m)$ entre conductivité hydraulique et potentiel matriciel, il suffit de disposer deux tensiomètres à quelques centimètres au-dessus et au-dessous du plan z pour calculer $\varphi(z, t)$. Le flux cumulé Φ_z sur une période (t_1, t_2) quelconque s'obtiendra par sommation :

$$\Phi_z = \int_{t_1}^{t_2} \varphi(z, t) dt \tag{3'}$$

III. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET TECHNIQUES DE MESURE

1. — *La parcelle*

La parcelle étudiée est située à La Minière, près de Versailles et porte une culture de maïs semée à une densité normale pour la région (90 000 pieds/hectare). Du point de vue pédologique, il s'agit d'un limon des plateaux reposant sur des horizons de plus en plus argileux en profondeur.

2. — *Mesure du flux en surface Φ_o*

Nous avons utilisé comme mesure du flux Φ_o, la variation de poids ΔW d'une cuve lysimétrique de deux mètres de profondeur et 2,10 m de diamètre, installée au centre de la parceell étudiée et portant la même culture.

Traduites en mm d'eau, les variations de poids de la cuve lysimétrique sont données par :

$$\Delta W = P - ETR_c \quad (6)$$

P = pluviométrie
ETR_c = évapotranspiration réelle de la cuve

Par ailleurs, le flux d'eau cumulé Φ_o à la surface du sol de la parcelle s'écrit pour la même période :

$$\Phi_o = P - ETR_p \pm r \quad (7)$$

ETR_p = évapotranspiration réelle de la parcelle
r = ruissellement

Dans les conditions de plateau horizontal qui sont les nôtres, le terme de ruissellement r est généralement nul. Si l'on admet l'égalité

$$ETR_c = ETR_p \quad (8)$$

qui traduit la bonne représentativité de la cuve lysimétrique vis-à-vis de la parcelle (cf. § IV. 1 *c*), on peut donc écrire :

$$\Phi_o = \Delta W \quad (9)$$

3. — *Mesure des variations du stock d'eau du sol* $[\Delta S]_0^z$

Le stock d'eau du sol a été évalué régulièrement entre juin et novembre 1974 à l'aide d'un humidimètre à neutrons du CEA, type HP 310, dont l'étalonnage a été contrôlé à l'aide de plusieurs mesures d'humidité pondérales effectuées dans la saison de mesure.

Cinq tubes d'accès de 2 m de longueur en duralumin AG 3 ont été mis en place verticalement sur la parcelle. Chaque semaine, sauf incident technique, tous ces tubes furent explorés de dix en dix centimètres entre les niveaux 15 cm et la profondeur 165 cm. Le stock d'eau pour chaque date et pour chaque profondeur a été calculé à partir de la moyenne des cinq tubes.

4. — *Mesure du potentiel matriciel* Ψm *et du gradient de potentiel total* $\frac{d\Psi t}{dz}$

Les tensiomètres considérés dans cette étude sont des appareils classiques (irrometer), munis d'un manomètre à lecture directe préalablement étalonné en laboratoire. Quatre d'entre eux ont été installés à proximité des tubes neutroniques, deux à 80 cm et deux à 90 cm de profondeur. Les lectures de potentiel matriciel ont été faites presque quotidiennement et le potentiel moyen total Ψt ($\Psi t = \Psi m + z$ si les potentiels sont exprimés en hauteur d'eau avec comme plan de référence la surface du sol) a été calculé aux deux niveaux considérés ainsi que le potentiel matriciel moyen à 85 cm de profondeur.

Le choix de cette profondeur nous a été imposé par le type de tensiomètres dont nous disposions. Nous admettrons (ce qui est une approximation) que les racines de maïs encore présentes à cette profondeur jouent un rôle négligeable dans le flux total et que, par conséquent, la loi de Darcy généralisée peut s'appliquer.

IV. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. — *Les flux en profondeur déterminés par la méthode du bilan hydrique*

La saison complète de mesure (du 18 juin au 4 novembre 1974) a été décomposée en cinq périodes d'une trentaine de jours environ. Les valeurs cumulées d'évapotranspiration ainsi que de flux dans le sol deviennent alors suffisamment grandes vis-à-vis des erreurs de mesure dont elles sont entachées.

Les résultats sont reportés dans le tableau 1. La pluie P, l'évapotranspiration réelle ETR et les flux cumulés dans le sol Φ_z à différentes profondeurs sont exprimés

en millimètres. Ces flux sont comptés positivement lorsqu'ils sont dirigés vers le bas (drainage), négativement dans le sens inverse (remontées capillaires et/ou transfert dans les racines). On a également reporté pour les flux dans le sol, les valeurs moyennes $\overline{\varphi_z}$ en millimètres par jour.

TABLEAU I

Les éléments du bilan hydrique et les flux d'eau dans le sol à différentes profondeurs pour cinq périodes consécutives de l'été, automne 1974

On a souligné la profondeur approximative du plan de flux nul :
trait simple = plan de divergence des flux
trait double = plan de convergence des flux

Période	I	II	III	IV	V
du	18-06	8-07	21-08	19-09	15-10
au	7-07	20-08	18-09	14-10	4-11
Nombre de jours	20	44	29	26	21
Pluie	42,9	60,8	75,9	92,4	82,2
ETR	54,3	146,8	74,6	37,9	11,0
Φ_o = P — ETR	— 11,4	— 86,0	1,3	54,5	71,2
$\overline{\varphi_o}$	— 0,57	— 1,95	0,04	2,10	3,39
Φ_{20}	— 3,3	— 59,6	— 24,6	35,5	65,9
$\overline{\varphi_{20}}$	— 0,17	— 1,36	— 0,85	1,37	3,14
Φ_{40}	2,4	— 27,1	— 30,0	2,7	60,3
$\overline{\varphi_{40}}$	0,12	— 0,61	— 1,03	0,10	2,87
Φ_{60}	3,2	— 10,2	— 25,0	— 19,2	53,2
$\overline{\varphi_{60}}$	0,16	— 0,23	— 0,86	— 0,74	2,53
Φ_{80}	2,7	— 3,6	— 21,3	— 21,5	41,8
$\overline{\varphi_{80}}$	0,14	— 0,08	— 0,73	— 0,83	1,99
Φ_{100}	3,5	0,3	— 20,4	— 21,2	34,8
$\overline{\varphi_{100}}$	0,18	0,01	— 0,70	— 0,82	1,66
Φ_{120}	5,2	3,3	— 19,9	— 20,8	29,9
$\overline{\varphi_{120}}$	0,26	0,08	— 0,69	— 0,80	1,42
Φ_{170}	4,8	9,4	— 18,4	— 18,7	21,0
$\overline{\varphi_{170}}$	0,24	0,21	— 0,63	— 0,72	1,00

Ces résultats conduisent à plusieurs remarques.

a) *Variation des flux avec la profondeur :*

On constate que pour une même période, les flux varient considérablement avec la profondeur ; ils sont fréquemment de signe opposé entre les couches supérieures et les couches profondes. Cela semble pour l'essentiel être dû à un phénomène de

déphasage entre la surface et la profondeur. Les couches superficielles en effet sont instantanément affectées par les conditions météorologiques qui commandent la valeur de Φ_o et les variations de flux se transmettent en profondeur avec un certain déphasage et un certain amortissement.

Ainsi observe-t-on un léger drainage à 170 cm de profondeur pour les périodes I et II alors que l'ETR l'emporte sur la pluie de façon notable ($\Phi_o = -97{,}4$ mm). Inversement, les remontées capillaires à cette profondeur se produisent tardivement et s'observent même au cours de la période IV alors que les pluies sont nettement supérieures à ETR.

Pour mieux mettre en évidence ce phénomène de déphasage, on a souligné dans le tableau 1 la profondeur où se situe en moyenne le plan de flux nul (plan qui sépare une zone de drainage d'une zone de remontées capillaires).

On observe ainsi que pour l'ensemble de la saison, deux plans de flux nul apparaissent successivement dans les couches supérieures du profil et semblent progresser en profondeur d'une période à l'autre. Ces deux plans ont d'ailleurs une signification parfaitement opposée :

— le premier (trait simple, périodes I et II) est un plan de divergence des flux car les couches de sol situées au-dessus sont le siège de flux ascendants alors que celles situées en dessous drainent.

— le second (trait double, périodes III et IV) est au contraire un plan de convergence puisque le sens des flux est opposé (drainage au-dessus, remontées en dessous).

b) *Importance relative des flux profonds.*

Le flux à 170 cm de profondeur, bien que toujours relativement faible lorsqu'on l'exprime en mm/jour, représente, au cours de certaines périodes, un élément non négligeable du bilan hydrique.

Cela est particulièrement net pour les périodes III et IV où les remontées capillaires (37,1 mm) atteignent 33 p. 100 de l'ETR (112,5 mm). Ainsi, les couches de sol situées en dessous de 170 cm, participent pour une part relativement importante à l'alimentation hydrique de la culture. Pourtant, le nombre de racines de maïs observées devient négligeable dès 1 m de profondeur. Il ne s'agit donc pas d'une alimentation directe par extraction racinaire mais bien de remontées capillaires au sens physique du terme, commandées bien entendu par le dessèchement des horizons supérieurs.

Remarquons enfin que ces flux ne s'accompagnent pas nécessairement de variations sensibles de teneur en eau dans la couche considérée. L'amplitude de la variation de stock observée dans la tranche de sol (80 cm, 170 cm) ne dépasse pas 21 mm, ce qui représente environ 8 p. 100 du stock de cette couche de sol à la capacité au champ ; les quantités d'eau qui ont transité dans un sens ou dans l'autre à travers cette même couche et dans le même temps, sont environ deux fois plus grandes. Le rôle de réservoir d'eau qu'elles jouent pour les plantes semble donc moins important (dans les conditions particulières de cette année) que celui de « transitaire ». Un tel comportement des couches profondes de sol amène évidemment à s'interroger sur la notion de réserve utile.

Cependant, des observations effectuées dans les mêmes conditions en 1973 (DAUDET et VALANCOGNE, 1974) nous avaient fait conclure à des remontées capillaires

quasiment nulles cette année-là. Il serait donc imprudent de généraliser l'importance du phénomène. De plus, les limons profonds sur lesquels nous l'avons observé sont particulièrement favorables à cet égard ; l'existence d'un sous-sol très profond, argileux et dont la teneur en eau est en permanence élevée (ce qui signifie qu'il s'agit d'une eau à potentiel élevé, douée par conséquent d'une mobilité relativement grande) conduit à une situation assez analogue à ce que donnerait une nappe d'eau libre peu profonde et quasi stationnaire, susceptible de fournir une quantité importante d'eau ; cela explique d'ailleurs la rareté avec laquelle se manifestent les phénomènes de sécheresse dans ces sols.

Le drainage de 21 mm observé au cours de la cinquième période représente quant à lui 26 p. 100 de la pluviométrie de la période (82,2 mm) mais il doit survenir principalement à la fin de celle-ci lorsque le stock d'eau du sol atteint ou dépasse la capacité au champ sur la totalité du profil.

Ainsi, même à une profondeur de l'ordre de 1,70 m, négliger ce terme de flux profond, conduirait à des bilans faussés, notamment quant à la valeur attribuée à ETR. On s'en convaincra en comparant (tabl. 2) les valeurs de l'ETR mesurées sur la cuve lysimétrique (ETR_c) et celles (ETR_n) que l'on aurait déterminées à l'aide simplement de la méthode neutronique en considérant le bilan hydrique tronqué (cf. équation 2) :

$$ETR_n = P - [\Delta S]_o^{170}$$

équation qui n'est strictement valable que dans l'hypothèse d'un flux nul à la profondeur 170 cm. La différence entre ETR_c et ETR_n correspond à Φ_{170} et représente l'erreur absolue ε_a que l'on fait sur la détermination de l'ETR par la méthode neutronique. L'erreur relative correspondante ε_r est portée dans la dernière ligne du tableau.

TABLEAU 2

Comparaison de deux estimations différentes de l'évapotranspiration réelle :

ETR_c = ETR déterminée à partir d'une cuve lysimétrique pesable.
ETR_n = ETR déterminée à partir de la méthode neutronique en négligeant les flux profonds.
ε_a et ε_r = erreurs absolue et relative sur ETR_n provenant de ces mêmes flux profonds.

Période	I	II	III	IV	V
du	18-06	8-07	21-08	19-09	15-10
au	7-07	20-08	18-09	14-10	4-11
ETR_c (mm)	54,3	146,8	74,6	37,9	11,0
ETR_n (mm)	59,1	156,2	56,2	19,2	32,0
ε_a (mm)	4,8	9,4	— 18,4	— 18,7	21,0
ε_r (%)	8,8	6,4	26,0	49,3	190,9

L'erreur commise en négligeant ces flux profonds peut donc être dans certains cas considérable ; ces résultats soulignent à notre sens l'intérêt d'une mesure plus précise de ces flux et d'une analyse des facteurs d'ordre pédologique, climatologique, cultural qui peuvent les affecter.

c) *Précision des valeurs trouvées.*

L'ordre de grandeur de l'erreur sur la détermination du flux cumulé Φ_z à la profondeur z peut être calculé à partir de l'expression (cf. équation (4), p. 167) :

$$\Phi_z = P - ETR - [\Delta S]_o^z$$

Dans cette équation, la différence P — ETR est donnée directement par le lysimètre pesable alors que $[\Delta S]_o^z$ résulte des mesures neutroniques. Chacun de ces termes est affecté d'une erreur particulière.

Erreur sur la différence P — ETR.

L'erreur sur la mesure des variations de poids du lysimètre étant supposée négligeable (< 1 mm), le problème qui se pose est en fait celui de la représentativité de la cuve lysimétrique par rapport au reste de la parcelle.

Cette représentativité peut être considérée comme bonne dans la mesure où les caractéristiques du sol n'ont pas été trop bouleversées lors du remplissage de la cuve (l'emploi de monolithes serait souhaitable) et où la culture présente un développement similaire sur la cuve et en dehors de celle-ci. Notons que dans le cas présent, le sol des cuves était en place depuis huit ans.

En début de saison de végétation, l'état initial étant sensiblement le même sur la cuve et dans la parcelle (réserve du sol totalement reconstituée), on peut admettre que la représentativité de la cuve est bonne. A plus long terme toutefois, le stock d'eau du sol en place tend à se différencier de celui de la cuve, par suite notamment des flux profonds de drainage et de remontée capillaire qui par principe n'existent pas dans la cuve pesable. On pourrait s'attendre alors à faire une mesure de l'ETR, légèrement par défaut en période de remontées capillaire. Cela conduirait à sous-estimer de la même quantité ces remontées capillaires.

Notons qu'une étude de la dispersion des valeurs de P — ETR obtenues à partir de plusieurs évapotranspiromètres identiques à l'intérieur d'une même parcelle a montré que l'hétérogénéité naturelle du couvert limite la précision des mesures à environ 5 p. 100 (PERRIER *et al.*, 1974).

Erreur sur $[\Delta S]_o$.

On envisagera uniquement ici le terme $[\Delta S]_o^{170}$ calculé sur la totalité du profil et pour lequel l'erreur est maximale.

Soit $\delta\theta_{tzd}$, la variation d'humidité observée pour le tube t à la profondeur z au cours de l'intervalle de temps d (d pour date). Rappelons que le terme $[\Delta S_d]_o^{170}$ correspondant à cet intervalle d est donné par :

$$[\Delta S_d]_o^{170} = \frac{1}{5} \sum_{t=1}^{5} \sum_{z=1}^{17} \delta\theta_{tzd}$$

Chaque terme $\delta\theta_{tzd}$ étant entaché d'une erreur ε_{tzd} de variance supposée constante $v_{\delta\theta}$, la variance de l'erreur sur $[\Delta S_d]_o^{170}$ est :

$$v_{\Delta S} = \frac{17 \times 5 \times v_{\delta\theta}}{25} \qquad (11)$$

Une analyse de variance de l'ensemble des valeurs de $\delta\theta_{tzd}$ a été pratiquée pour évaluer le terme $v_{\delta\theta}$. Le résultat de cette analyse est résumé dans le tableau 3.

L'estimation ainsi obtenue de $\nu_{\delta\theta}$ ($\nu_{\delta\theta} = 1{,}55$) conduit, pour la variance de l'erreur sur $[\Delta S]_o^{170}$, à :

$$\nu_{\Delta S} = 5{,}27$$

ce qui correspond à un écart-type :

$$\sigma_{\Delta S} = \sqrt{\nu_{\Delta S}} = 2{,}30 \text{ mm}$$

L'intervalle de confiance sur $[\Delta S]_o^{170}$ est donc de l'ordre de $\pm$ 4,6 mm.

TABLEAU 3

Analyse de variance des écarts d'humidité interdate

Source de variation	Somme des carrés	Variance	d.d.l.	F (degré de signification)
Total	11 433,05	28,65	399	
Erreur	372,34	1,55	240	
Date (D)	4 114,58	1 028,64	4	663,03 (+++)
Profondeur (Z)	87,38	5,83	15	3,75 (+++)
Interaction D, Z	6 788,75	113,15	60	72,93 (+++)
Tube (T)	2,73	0,68	4	0,44 (—)
Interaction T, D	52,34	3,27	16	2,10 (++)
Interaction T, Z	14,93	0,25	60	0,16 (—)

L'analyse du tableau 3 permet en outre de constater que l'effet principal « tube » (T) ainsi que l'interaction tube-profondeur (T, Z) sont en moyenne non significatifs alors que l'interaction date-tube (T, D) est très significative.

Cela indique que sur de longues périodes, les cinq emplacements (tubes) considérés dans la parcelle ne se comportent pas de façon significativement différente en ce qui concerne les variations d'humidité. Si l'on considère au contraire chaque période en particulier, des hétérogénéités apparaissent entre les tubes, rendant significative l'interaction (T, D).

On peut rechercher si ces hétérogénéités dans les variations de stock d'un emplacement à l'autre se répartissent uniformément sur toute la saison ou si elles sont plus spécialement attachées à certaines périodes. Il suffit pour cela de rechercher la contribution de chaque période à la somme des carrés de l'interaction (T, D). Les résultats de ce calcul sont reportés dans le tableau 4.

TABLEAU 4

Répartition dans le temps de l'interaction tube, date

Période	I	II	III	IV	V	Total
Somme des carrés pour l'interaction T, D	3,70	5,99	24,90	11,79	5,96	52,34

On voit ainsi que les hétérogénéités les plus grandes apparaissent au cours des périodes III et IV. Or celles-ci qui sont marquées par des pluies fréquentes et supérieures à l'évapotranspiration correspondent au début de la phase de reconstitution du stock hydrique du sol. On peut penser que les phénomènes de microruissellement conduisant par endroits à des infiltrations privilégiées sont alors importants et expliquent les hétérogénéités relativement grandes observées entre tubes. La phase V, bien que très pluvieuse, conduit à des hétérogénéités beaucoup moins grandes car les stocks sont alors presque intégralement reconstitués, ce qui limite l'amplitude des variations d'humidité observables.

Erreur sur le flux cumulé Φ_{170}.

L'erreur sur Φ_{170} est égale à la somme des deux erreurs que nous venons d'analyser. L'intervalle de confiance sur chaque détermination de Φ_{170} est ainsi de l'ordre de $\pm$ (4,6 + 0,05 | P — ETR |).

Le tableau 5 reprend pour chaque période les valeurs de Φ_{170} et de l'intervalle de confiance correspondant.

TABLEAU 5

Valeur du flux d'eau à 1,70 m de profondeur et intervalle de confiance

Période	I	II	III	IV	V
Φ_{170}	4,8	9,4	— 18,4	— 18,7	21,0
Intervalle de confiance .	5,1	8,9	8,3	7,3	8,2

On voit ainsi que les valeurs de Φ_{170} sont significativement différentes de zéro sauf pour la première période. Une imprécision encore assez grande subsiste néanmoins dans la détermination de ces flux ; c'est la raison pour laquelle nous avons été conduits à les calculer sur des périodes aussi longues. Remarquons que pour des profondeurs plus faibles, l'erreur sur $[\Delta S]_o^z$ diminuant alors que les flux augmentent généralement, l'erreur relative sur Φ_z est sans doute plus faible.

L'amélioration des mesures neutroniques serait de nature à diminuer l'incertitude sur ces flux. Compte tenu de ce qui a été vu sur la variabilité du terme $[\Delta S]_o^z$, on aura intérêt en particulier à augmenter le nombre de tubes neutroniques, notamment si l'on veut améliorer la détermination de Φ_z en période de reconstitution des réserves.

2. — *Les flux à 85 cm calculés à partir de la loi de Darcy*

a) *Potentiel matriciel et gradient de potentiel total à 85 cm de profondeur.*

On a reporté sur la figure 1 l'évolution journalière du potentiel matriciel à 85 cm de profondeur (courbe *a*) et du gradient de potentiel hydrique total à ce niveau (courbe *b*) entre le 23 juillet et le 5 novembre ; la convention de signe adoptée fait que des valeurs positives du gradient correspondent, selon la loi de Darcy généralisée, (cf. équation 3) à des remontées capillaires.

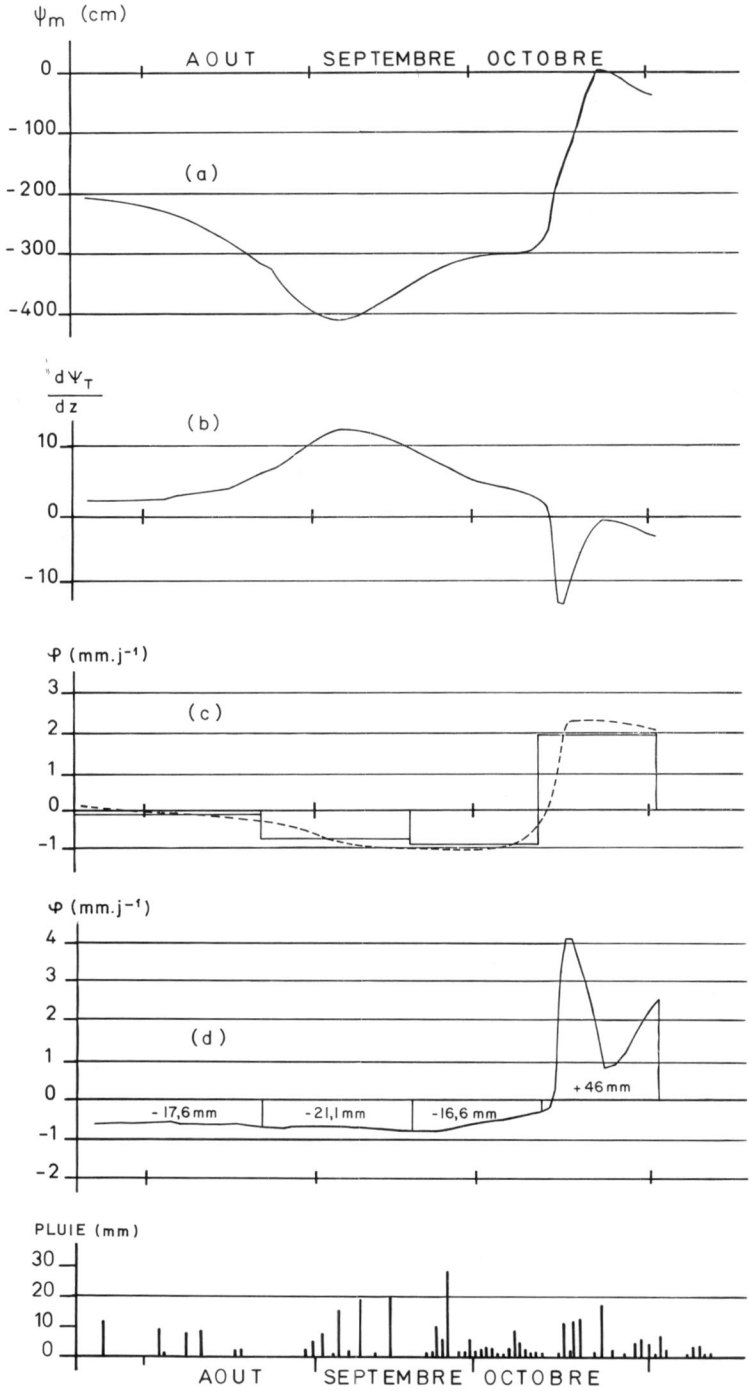


FIG. 1. — *Évolution au cours du temps*

a) du potentiel matriciel moyen à 85 cm de profondeur
b) du gradient de potentiel total à la même profondeur
c) du flux « mesuré »
d) du flux calculé par application de la loi de Darcy.

(Les flux positifs correspondent à du drainage)

b) *Détermination de la relation conductivité hydraulique — potentiel matriciel.*

Pour obtenir la valeur de la conductivité hydraulique K du sol en place, il faut confronter des mesures de flux et de gradient de potentiel hydrique. Une difficulté apparaît du fait que les valeurs de potentiel hydrique mesurées par tensiométrie ont une signification instantanée alors que celles de flux portent sur des périodes relativement longues (10 à 15 jours minimum) et ont la signification de valeurs intégrées ou cumulées.

Dans un but purement exploratoire, nous avons tenté de déterminer la relation $K(\Psi_m)$ à 85 cm de profondeur, à partir des valeurs de flux calculées comme on l'a vu précédemment et des relevés tensiométriques des courbes *a* et *b*, figure 1. Par ailleurs, la relation $K(\Psi_m)$ a été recherchée sous la forme d'un ajustement exponentiel :

$$K = K_o \exp(-\alpha \Psi_m) \qquad (12)$$

Cette forme est en effet la plus simple pour traduire ce que l'on sait d'une façon générale sur la relation $K(\Psi_m)$ et il n'y avait pas lieu ici de rechercher un ajustement plus précis compte tenu du petit nombre de points dont nous disposions.

Pour déterminer la valeur des coefficients K_o (conductivité de sol saturé) et α de l'expression ci-dessus, nous avons tout d'abord construit une courbe lissée du flux à 85 cm de profondeur, φ_{85} (courbe *c*, traits tiretés, fig. 1). On a simplement imposé deux conditions pour ce lissage :

— que la valeur de flux cumulé pour chaque période corresponde à celle effectivement mesurée ;

— que ce flux s'annule le 16 octobre, date à laquelle le gradient de potentiel total observé est lui-même nul.

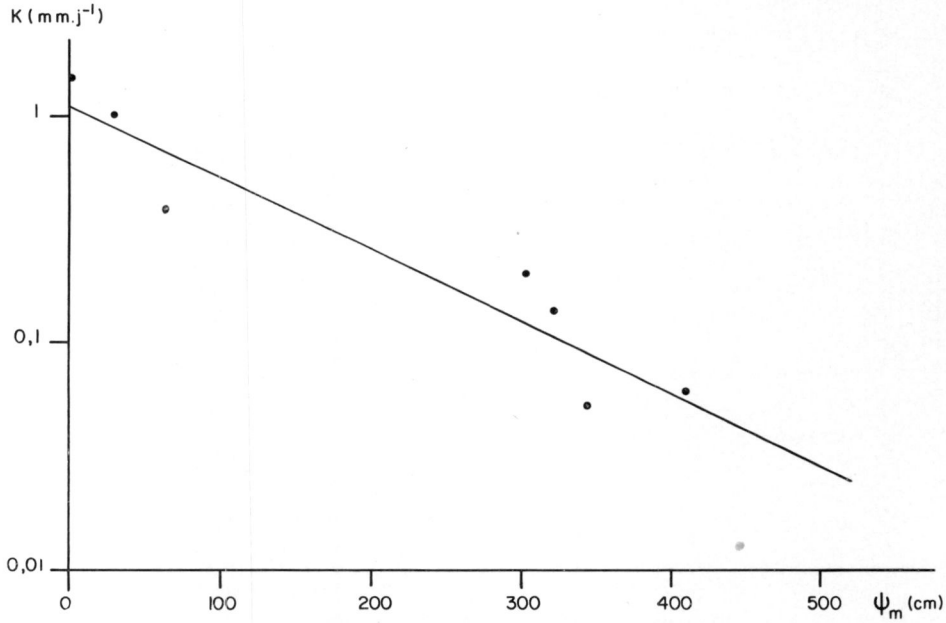


FIG. 2. — *Ajustement linéaire-logarithmique de la conductivité hydraulique en fonction du potentiel matriciel*

Disposant ainsi d'une première estimation des flux journaliers sur la saison, la comparaison avec quelques valeurs journalières de Ψ_m et de $\frac{d\Psi t}{dz}$ (courbes *a* et *b*, fig. 1) a permis un calcul approximatif de K. Les points ainsi obtenus ont été reportés sur un graphique $K(\Psi_m)$ en coordonnées semi-logarithmiques (fig. 2). La droite de régression calculée à travers ces points (coefficient de corrélation $r = 0{,}95$) nous a finalement fourni la fonction $K(\Psi_m)$ recherchée :

$$K = 1{,}1 \exp(-0{,}00726\, \Psi_m) \qquad (12')$$

K = conductivité hydraulique du sol en mm/jour
Ψ_m = potentiel matriciel en centimètres d'eau

La valeur de la conductivité hydraulique à saturation $K_o = 1{,}1$ mm/jour est sans doute faible comparée à ce que donnerait une mesure directe de vitesse d'infiltration dans le sol saturé, par une méthode de type MUNTZ par exemple. Cela tient certainement au fait que cette valeur est obtenue par une extrapolation à partir du domaine non saturé. On remarquera toutefois qu'il s'agit de terrains très peu perméables et particulièrement sujets à l'engorgement.

c) *Calcul des flux journaliers et cumulés à 85 cm de profondeur.*

L'application de la loi de DARCY généralisée (équation 5) aux valeurs de Ψ_m et de $\frac{d\Psi t}{dz}$ mesurées quotidiennement a permis en utilisant l'expression (12') de calculer e flux journalier à 85 cm de profondeur. La courbe de la figure 1 *d* représente l'évolution de ce flux au cours du temps.

La sommation des valeurs journalières sur les quatre périodes retenues, conduit à des valeurs calculées du flux cumulé que l'on peut comparer aux valeurs « mesurées » par la première méthode (tabl. 6).

TABLEAU 6

Comparaison de deux évaluations différentes du flux à 85 cm de profondeur :
Flux « mesuré » = méthode du bilan hydrique ;
Flux « calculé » = application de la loi de Darcy généralisée.

Période		II	III	IV	V
du		23-07	21-08	19-09	15-10
au		20-08	18-09	14-10	4-11
Flux cumulé en mm à 85 cm	calculé	— 17,6	— 21,1	— 16,6	+ 46,0
	mesuré	— 2,0	— 21,2	— 21,3	+ 40,0

La concordance entre ces deux types de valeur pour les périodes III, IV et V est bonne mais on ne saurait toutefois s'en étonner compte tenu de la façon dont a été établie la relation $K(\Psi_m)$: les deux méthodes ne sont pas indépendantes. Il

n'y a donc pas là une preuve quelconque de la fiabilité de la méthode fondée sur la loi de DARCY. En ce qui concerne la période II, l'écart entre les deux valeurs est important mais les remontées capillaires de 2 mm admises pour cette période sont très incertaines. La mesure directe des flux portait en réalité sur une période plus longue (du 8-07 au 20-08) et donnait des remontées de 3,1 mm, soit une moyenne de 0,07 mm/jour. Cette période a pu comprendre une phase de drainage (avant le 23-07) suivie d'une phase de remontées capillaires dont l'intensité serait ainsi très sous-estimée par la valeur moyenne de 0,07 mm/jour. Cela explique probablement une partie de l'écart entre flux « mesuré » et flux calculé pour cette période.

Le calcul des flux cumulés sur des périodes quelconques ne constitue pas le seul intérêt de la méthode que nous venons d'envisager. Puisqu'en effet, celle-ci est fondée sur le calcul du flux journalier à une profondeur donnée, elle fournit des informations nouvelles sur la dynamique des flux et sur les valeurs extrêmes qu'ils peuvent prendre.

L'examen de la figure 1 *d* montre que les flux de remontées capillaires sont remarquablement stables et d'intensité relativement faible. Les flux de drainage par contre peuvent varier très rapidement. On notera en particulier (mais sous toute réserve) que la valeur maximale du drainage calculé à 85 cm de profondeur (4,1 mm/jour) ne coïncide pas avec la saturation du sol ($\Psi_m = 0$ le 27 octobre), c'est-à dire avec la conductivité hydraulique maximale du sol, mais qu'elle correspond à un maximum de gradient de potentiel hydrique total qui est survenu quelques jours auparavant (18 et 19 octobre).

Ce résultat, à première vue surprenant, demande à être confirmé par de nouvelles observations. Il illustre cependant l'intérêt de ce type d'approche pour l'analyse des phénomènes de drainage ou de remontées capillaires dans le sous-sol.

V. — CONCLUSION

Nous avons montré que les termes de drainage ou de remontées capillaires même à une profondeur de l'ordre de 1,50 m, peuvent représenter un élément non négligeable du bilan hydrique des sols cultivés. Que ce soit pour des problèmes d'hydrologie ou pour l'étude de la dynamique des éléments dissous dans le sol, une mesure relativement précise de ces flux est donc à rechercher.

L'utilisation d'un humidimètre à neutrons, conjointement à la mesure directe de l'évapotranspiration réelle ETR d'un couvert végétal, permet d'évaluer à peu près correctement les flux verticaux d'eau dans le sol, quelle que soit la profondeur. Malheureusement, ETR est une donnée encore assez difficile à mesurer avec précision et l'emploi généralisé de cuves lysimétriques pesables de grande profondeur pour cette mesure, ne saurait être envisagé.

La technique du bilan énergétique, beaucoup plus légère et maintenant bien connue (PERRIER *et al.*, 1975), fournit une mesure plus facile de l'ETR sur des périodes de l'ordre de la dizaine de jours et avec une précision comparable à celle des cuves pesables. Elle permet donc éventuellement, si on l'associe à des mesures neutroniques, de mesurer les flux d'eau dans le sol. Une étude dans ce sens est actuellement en

cours dans notre station de la Minière et nous envisageons pour l'avenir de l'étendre à des situations variées de sols et de cultures.

On peut d'autre part, en appliquant la loi de DARCY généralisée, calculer ces flux profonds selon un principe entièrement différent, à partir de simples mesures tensiométriques. Pour cela, un étalonnage préalable du sol sous la forme d'une relation K (Ψ_m) est nécessaire. Cet étalonnage suppose que, pendant une période limitée, soient mises en œuvre des mesures simultanées de l'ETR, du potentiel hydrique et des variations de stock d'eau du sol. La technique du bilan énergétique est encore utilisable, mais des procédés plus simples peuvent être envisagés ; par exemple, l'étude de la redistribution de l'eau après une pluie ou une irrigation abondante, en l'absence d'évaporation (sol nu recouvert d'un film plastique sur une surface suffisamment grande, cf. GARDNER *et al.*, 1970).

Les résultats présentés ici, bien que très fragmentaires, permettent de penser que la mise au point de cette méthode de calcul des flux à partir de la loi de DARCY est possible dans un avenir assez proche. Tout en mettant en jeu des techniques classiques bien connues et rustiques, elle présenterait plusieurs avantages :

— possibilité d'enregistrement,
— étude des flux à l'échelle journalière,
— relative simplicité...

La limite essentielle de la méthode réside en fait dans l'hystérésis qui peut affecter la relation K (Ψ_m). En plaçant le niveau z de mesure à une profondeur suffisamment grande pour que les variations saisonnières d'humidité et de potentiel hydrique soient très atténuées, on peut penser limiter cet effet d'hystérésis. Seules, des études sur des périodes suffisamment longues et variées d'un point de vue hydrologique, permettront de porter une appréciation motivée sur la validité de la méthode proposée.

Reçu pour publication en mars 1976.

SUMMARY

MEASUREMENT OF THE DRAINAGE OR CAPILLARY RISE DEEP FLUXES. THEIR IMPORTANCE IN THE WATER BALANCE

In the estimate of the water balance, vertical deep fluxes of drainage or capillary rise are generally ignored. This may lead to important errors in the evaluation of the actual consumption of water by evapotranspiration.

The determination by independent methods of the actual evapotranspiration (deep weighing lysimeter) and of the variations of the total water content of the soil profile (neutron probe), allows to calculate these vertical deep fluxes for time periods of about twenty days.

It is shown that in the particular conditions of a deep loam and of a corn canopy, capillary rises at 1,50 m depth may in summer, account for an important part of the water consumption by evapotranspiration.

Finally a method to evaluate these deep fluxes on a daily basis, by applying the generalized Darcy's law is proposed. It involves tensiometer readings in depth and a preliminary calibration of the soil to know the hydraulic conductivity at the considered depth and its variation in relation to the matric potential. The first results obtained by this method are presented.

ZUSAMMENFASSUNG

MESSUNG DER TIEFEN ENTWÄSSERUNGS-ODER KAPILLAR ANSTIEGFLÜSSE IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE WASSERBILANZ

Üblicherweise sind die vertikalen Flüsse der Entwässerung oder der Kapillar anstiege in der Tiefe für die Schätzung der Wasserbilanz unterlassen. Dies führt in gewissen Fällen zu wichtigen Fehlern in der Schätzung des durch Evapotranspiration bedingten Wasserverbrauchs.

Die Bestimmung der Evapotranspiration (wägbarer Lysimeter von grosser Bodentiefe) und der Schwankungen der Bodenwasserreserve (Neutronenfauchtigkeitsmesser) mit unabhängigen Methoden erlaubt diese tiefen vertikalen Flüsse für etwa 20 tägige Perioden zu rechnen.

Es wird gezeigt dase, unter den für einen Tieflehm charakteristischen Bedingungen und im Falle einer Maiskultur, die Kapillaranstiege zu einer Tiefe von 1,50 m im Sommer einen wichtigen Teil des durch Evapotranspiration verbrauchten Wassers liefern können.

Schliesslich wurde eine Methode für die tageszeitliche Schätzung dieser Flüsse mit Anwendung des verallgemeinerten Gesetzes von Darcy vergeschlagt. Sie schliesst tiefgehende Druckaufnahmen und eine vorhergehende Bodeneichung ein, um die Wasserleiträhigkeit zu der studierten Tiefe und ihre Variation gemäss dem matriziellen Potential zu kennen. Die durch eine Voruntersuchung dieser Methode erzielten Ergebnisse werden vorgestellt.

РЕЗЮМЕ

Измерение глубинных потоков дренажа, или капилярных подемов, и их важность для водного баланса.

Ф. А. ДОДЕ, К. ВАЛАНКОНЬ.

При установлении водного баланса обычно забывается о вертикальных потоках дренажа, или капилярных под'емах на глубине, что и приводит иногда к крупным ошибкам при оценке потребления влаги эвапотранспирацией.

Определение эвапотранспирации независимыми методами (эвапотранспирация измеряющаяся весовым методом на большой глубине) и изменений водных резервов почвы (с помощью нейтронного влагомера), позволяют вычислить эти вертикальные глубинные потоки для приблизительно двадцатидневных периодов.

В данном труде доказывается что в особых условиях глубокого суглинка и культуры кукурузы капилярные под'емы на глубине в 1,50 м. могут доставить летом большую часть влаги потребляемой эвапотранспирацией.

И, наконец, предлагается метод оценки этого потока в однодневном масштабе с применением обобщенного закона Дарси. При этом необходимо проводить тенсиометрические измерения на глубинах, предварительное эталонирование для определения водопроводимости почвы на предусмотренной глубине, и ее изменений в зависимости от матричного потенциала. В данной работе представлены результаты полученные при предварительном изучении этого метода.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CARY J. W., 1968. An instrument for *in situ* measurements of soil moisture flow and suctions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32**, 3-5, 1968.

DAUDET F. A., VALANCOGNE Ch., 1974. Détermination des flux d'eau en profondeur par association de la méthode neutronique et de la mesure directe de l'évapotranspiration réelle sur cuve pesable. *Ministère de la Qualité de la vie. Groupe d'étude des mouvements de l'eau dans les sols non saturés.* Réunion des 19 et 20 juin 1974. (Sous presse).

GARDNER W. R., HILLEL D., BENYAMINI Y., 1970. Post-irrigation movement of soil water. I. — Redistribution. *Water resources Res.*, **6** (3), 851-861. II. — Simultaneous redistribution and evaporation. *Water Resources Res.*, **6** (4), 1148-1153.

PERRIER A., ARCHER Ph., BLANCO DE PABLOS A., 1974. Étude de l'évapotranspiration réelle et maximale de diverses cultures : dispositif et mesures. *Ann. agron.*, **25** (5), 697-731.

PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J.-M., BLANCO DE PABLOS A., 1975. Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture, exemples d'application. *Ann. agron.*, **26** (1), 19-40.

ROSE C. W., STERN, 1967. The drainage component of the water balance équation. *Aust. J. Soil Res.*, **3**, 95-100.

WARD R. C., 1967. Water balance in a small catchment. *Nature*, **213**, n° 5072, 123-125.

Ann. agron., 1976, **27** (2), 183-205.

INFLUENCE DES FACTEURS DU MILIEU SUR L'ABSORPTION HYDRIQUE. ÉTUDE EFFECTUÉE SUR TOMATE DÉCAPITÉE EN EXSUDATION

I. — Facteurs nutritionnels

J. MORIZET et M. MINGEAU
avec la collaboration technique de Lucette Le Blevenec et H. Raynaud

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I. N. R. A.,
12, Avenue de l'Agriculture,
63100 Clermont-Ferrand

RÉSUMÉ

La présente étude concerne l'action des facteurs nutritionnels N, P, K sur l'absorption hydrique. Elle s'appuie sur les données fournies par l'exsudation de plants de tomates (*Solanum lycopersicum*). Les mesures portent notamment sur les débits d'exsudation, les poussées radiculaires et les pressions osmotiques des exsudats qui permettent de calculer les conductivités racinaires pour l'eau et les débits salins.

La carence azotée se traduit par une augmentation des résistances à l'absorption de l'eau. La carence phosphorique va dans le même sens mais les symptômes sont beaucoup plus longs à apparaître. La carence potassique, au contraire, entraîne une plus grande facilité de transfert.

Les résultats obtenus permettent en outre de formuler des observations générales concernant notamment : le comportement des deux voies empruntées par l'eau dans la racine à la suite d'une modification des facteurs nutritionnels, la différenciation du temps de latence dans la réponse des deux paramètres K et D_s et les mécanismes d'une relative régulation de la concentration saline de l'exsudat.

INTRODUCTION

Les transferts hydriques du sol à l'atmosphère par l'intermédiaire du couvert végétal sont sous la dépendance directe des facteurs physiques du milieu. Ces derniers déterminent les niveaux de potentiels hydriques dans l'air et dans le sol et règlent l'apport énergétique assurant le passage de la phase liquide à la phase gazeuse, lors de la transpiration.

Vu sous cet angle purement thermodynamique, l'étude des flux hydriques à travers la plante est incomplète. En effet, les facteurs du milieu interviennent également, d'une façon indirecte, en agissant sur les caractéristiques du conducteur hydrique, c'est-à-dire de la plante.

Cela est évident quand les contraintes extérieures à long terme pèsent sur la morphologie et la croissance de la plante (taille des feuilles par exemple). Mais cela est également vrai à plus court terme quand, par suite de modifications rapides des conditions du milieu, le fonctionnement de certains organes ou de certaines unités structurales de la plante se trouve perturbé.

L'action de quelques facteurs sur le comportement des racines vis-à-vis de l'eau, a déjà été étudiée en détails ; notamment celle du potentiel hydrique du milieu aérien ou racinaire (BROUWER, 1953 et 1954 ; STOKER et WEATHERLEY, 1971), celle des inhibiteurs métaboliques (VAN ANDEL, 1953 ; BROUWER, 1954 ; MEES et WEATHERLEY, 1957 ; GINSBURG et GINZBURG, 1970) et enfin celle de la température (GINSBURG et GINZBURG, 1971).

L'influence des facteurs nutritionnels a également été analysée soit sur plante entière (MINGEAU, 1969 ; MINGEAU et ROBELIN, 1972), soit sur plante décapitée (LUNDEGARDH, 1943 ; SPEIDEL, 1939 ; VOLK, 1944). Mais ces études, si elles ont fourni des indications précieuses sur le « comportement hydrique » des plantes placées en conditions variées d'alimentation minérale, n'ont généralement apporté que peu d'information sur les modalités d'action des différents éléments.

Grâce à une approche plus analytique des phénomènes, nous nous proposons, au cours de ce travail, de montrer l'influence des facteurs nutritionnels (N-P-K) sur l'absorption hydrique et d'essayer d'expliciter les mécanismes mis en jeu. Dans une deuxième partie, nous compléterons ces informations en indiquant les interactions qui existent entre la nutrition azotée et deux facteurs physiques du milieu (conditions climatiques et teneur en oxygène de la rhizosphère) après avoir précisé la propre influence de ces composantes de l'environnement.

Pour l'ensemble de ces études, les observations portent sur l'exsudation de tomates décapitées, cette technique permettant d'obtenir certains éléments d'information importants, tels que poussée et conductivité racinaires (MORIZET et ROBELIN, 1972 et 1975).

I. — MATÉRIEL VÉGÉTAL ET MÉTHODES

1. — *Matériel végétal et conduite des cultures*

Les études sont menées sur tomates de variété « Marmande », matériel végétal déjà utilisé pour la mise au point d'une technique de détermination des poussées radiculaires (MORIZET et ROBELIN, 1972 et 1975). Cette espèce a été choisie à cause de son exsudation abondante.

La culture est effectuée soit à l'extérieur (protection par abri mobile en cas de pluie) pour la période estivale, soit en serre pour le reste de l'année.

Après germination sur vermiculite, chaque plantule est placée dans un pot (volume 12 l) rempli de sable quartzeux. L'alimentation hydrique et minérale est assurée par un arrosage périodique de solution nutritive recyclée (en moyenne 0,5 l par pot toutes les 20 minutes).

Diverses solutions nutritives sont utilisées suivant les essais (tabl. 1).

Ajoutons que toutes les solutions contiennent en plus les éléments indiqués ci-dessous (par litre de solution) :

— 10 mg de NaCl ; 2 mg de Fe (chélate : D.T.P.A.) ; 0,20 mg de Mn (SO_4Mn, 1 H_2O) ; 0,20 mg

de Zn (SO_4Zn, 7 H_2O) ; 0,10 mg de B (BO_3H_3) ; 0,05 mg de Cu (SO_4Cu, 5 H_2O) ; 0,05 mg de Mo ($MoO_4(NH_4)_2$).

Le pH est ajusté à 6,2.

TABLEAU I

Concentration ionique des différentes solutions nutritives utilisées (meq/l)

Solutions	Ions											Pression osmotique en bar
	Anions						Cations					
	NO_3^-	$PO_4H_2^-$	PO_4H^{--}	SO_4^{--}	Cl^-	Total	NH^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Total	
T_1	6,20	0,55	1,10	3,30		11,15	1,10	3,65	4,20	2,20	11,15	0,4
N_0		0,55	1,10	4,20	4,20	10,05		3,65	4,20	2,20	10,05	0,4
T_2	5,00	0,55		2,20		7,75	0,55	3,60	1,40	2,20	7,75	0,3
P_0	5,00			2,20	0,55	7,75	0,55	3,60	1,40	2,20	7,75	0,3
K_0	5,00	0,55		2,20		7,75	0,55		5,00	2,20	7,75	0,3

2. — *Protocole expérimental. Différents traitements*

La différenciation des traitements se fait un mois environ après le repiquage, ce qui correspond au début de la floraison. Elle consiste à remplacer la solution nutritive complète par une solution carencée en un élément N, P ou K (tabl. 1) ou totalement carencée (eau déminéralisée).

Les résultats représentent une moyenne portant sur trois plantes traitées. Ils sont comparés aux données fournies par trois plantes témoins qui continuent à bénéficier d'une nutrition minérale complète.

Deux séries d'expérimentation ont été réalisées, suivant des modalités différentes :

a) *Carence azotée ou carence totale.*

Les plantes avant différenciation des traitements et les plantes témoins après différenciation des traitements sont arrosées avec la solution complète T_1 (tabl. 1). Les plantes dont l'alimentation est carencée en azote sont arrosées avec la solution N_0. Enfin la carence nutritionnelle totale est réalisée avec de l'eau déminéralisée additionnée de 30 g de polyéthylène glycol 4000 par litre (solution isotonique aux solutions nutritives). La durée des traitements est de deux jours. Une carence en azote a été exceptionnellement prolongée jusqu'à cessation complète de l'exsudation qui s'est produite au bout de 24 jours.

Dans cette première série d'expérimentations, les plantes sont transférées la veille de la décapitation dans une chambre de végétation dont la température est constante (21,0 $\pm$ 0,5°C).

b) *Carence phosphorique ou carence potassique.*

La solution complète utilisée est la solution T_2. Elle diffère de la solution T_1 notamment par une teneur en phosphore plus faible qui permet d'obtenir plus rapidement des plantes carencées en cet élément après son remplacement par la solution P_0. La nutrition carencée en potasse est assurée par la solution K_0.

La réponse à une alimentation carencée en P ou en K étant moins rapide que celle obtenue à la suite d'une carence N ou d'une carence totale, les traitements sont prolongés durant 6, 12 ou 24 jours.

Les contrôles d'exsudation sont réalisés sous serre, donc à température variable. Le recueil de la sève s'effectue en trois fractions correspondant à la matinée (8 h-13 h), l'après-midi (13 h 18 h) et la nuit (18 h-8 h).

A ces deux séries d'expérimentation portant sur l'action de différentes carences nutrition-

nelles, il faut ajouter un essai montrant l'interaction qui existe entre l'alimentation hydrique et l'alimentation minérale. Il consiste à interrompre l'arrosage par solution nutritive 15 heures avant la décapitation et à réalimenter ensuite soit avec la solution nutritive complète T_1, soit avec de l'eau déminéralisée. Nous détaillerons ce protocole lors de la présentation des résultats.

3. — *Déterminations effectuées*

a) *Carence azotée ou carencée totale.*

Après décapitation des plantes effectuée entre 7 heures et 8 heures du matin, le dispositif des mesures des débits d'exsudation et des poussées radiculaires est adapté à chaque tige suivant une technique déjà décrite (MORIZET et ROBELIN, 1972 et 1975). Une mesure de ces deux paramètres est effectuée environ toutes les deux heures.

La sève exsudée est recueillie en dehors des périodes de mesures et les exsudats fractionnés font l'objet des analyses suivantes :

— détermination des pressions osmotiques par cryoscopie (CURRIER, 1944) ;
— détermination des éléments chimiques suivants :
  — azote total : méthode LEFEBVRE et JOLIET (1967) ;
  — azote nitrique : méthode GRANDVAL et LAJOUX modifiée par CARON et RAQUET ;
  — azote ammoniacal : méthode au Nessler de ROUTCHENKO (1967) ;
  — azote organique = azote total — azote minéral ;
  — phosphore : méthode colorimétrique avec le réactif nitro-vanado molybdique ;
  — potassium : dosage au photomètre à flamme ;
  — sodium : dosage au photomètre à flamme.

Les surfaces foliaires des tomates sont mesurées juste après la décapitation à l'aide d'un compteur automatique de surface (modèle AAM-5 Hayashi Denko Co., LTD).

b) *Carence phosphorique et carence potassique.*

Les mêmes déterminations sont effectuées sauf :

— mesures de poussées radiculaires,
— mesures de pressions osmotiques.

4. — *Calcul des conductivités racinaires*

Nous rappelons (MORIZET et ROBELIN, 1975) que la conductivité racinaire globale K est donnée par :

$$K = \frac{D}{P} \qquad (1)$$

avec D = débit d'exsudation,
P = poussée radiculaire.

5. — *Calcul des débits salins*

Par débits salins, nous entendons la quantité de sels véhiculés par l'exsudat pendant l'unité de temps.

Suivant que les pressions osmotiques sont ou non déterminées, les débits salins sont estimés de façons différentes :

a) *Pressions osmotiques déterminées* (traitements : carence N ou carence totale).

Nous prenons en compte la pression osmotique représentative de la concentration en osmoles conformément à la loi de Van T'Hoff :

$$\pi = nRT = Kn \qquad (2)$$

π : concentration osmotique d'une solution diluée
n : concentration en moles de la solution
R : constante des gaz parfaits
T : température absolue
K = RT = constante si la température est elle-même constante.

Ainsi, nous appelons débit salin D_s, le produit du débit d'exsudation D par la pression osmotique π_s de l'exsudat.

$$D_s = D \cdot \pi_s \tag{3}$$

b) *Pressions osmotiques non déterminées* (traitements carence P ou carence K).

Dans ce cas, les débits salins sont estimés (d'une façon approximative) à partir des teneurs des éléments dosés dans les exsudats (en meq $\cdot$ l^{-1}).

6. — *Débits d'un élément* D_E

Ces débits représentent la quantité d'un élément minéral (N-P-K-Ca) véhiculé par l'exsudat pendant l'unité de temps. Ils sont calculés à partir du débit d'exsudation D et de la concentration C_E de l'exsudat en cet élément :

$$D_E = D \cdot C_E \tag{4}$$

II. — RÉSULTATS

Avant de rendre compte des résultats, nous ferons les observations préliminaires suivantes qui justifient la façon de présenter les données expérimentales et calculées.

Les débits d'exsudation D, donc également les débits d'absorption d'une plante décapitée, dépendent de deux paramètres :

— de la « conductivité sélective » K_s (MORIZET et ROBELIN, 1975)

— et du débit salin D_s.

En effet, si nous faisons l'hypothèse que le mécanisme osmotique rend entièrement compte des transferts hydriques, nous pouvons écrire :

$$D = K_s(\pi_s - \pi_e) \text{ (1)} \tag{5}$$

où π_s est la pression osmotique de l'exsudat

et π_e est la pression osmotique de la solution nutritive.

D'autre part, nous avons posé, par définition :

$$D_s = D \cdot \pi_s \tag{3}$$

La combinaison de ces équations conduit à :

$$D^2 + K_s\pi_e D - K_s D_s = 0$$

d'où l'on tire la valeur de D :

$$D = \frac{1}{2}\left(\sqrt{K_s^2\pi_e^2 + 4K_s D_s} - K_s\pi_e\right) \tag{6}$$

Si la pression osmotique de la solution nutritive est constante, cette relation exprime bien que le débit d'exsudation D ne dépend que de la « conductivité sélective » K_s et du débit salin D_s.

(1) Dans l'hypothèse d'une hémiperméabilité parfaite des membranes et dans le cas où la différence de pression osmotique π_s-π_e représente celle existant aux bornes de la barrière hémiperméable (MORIZET et ROBELIN, 1975).

Pour cette raison, dans la présentation des résultats, il serait logique d'analyser les variations de D à partir de la cinétique de ses « composantes » D_s et K_s.

En fait, vu l'imprécision qui s'attache à la détermination de K_s, nous préférons indiquer, en général, les valeurs de la conductivité globale $K = K_s + K_1$ (MORIZET et ROBELIN, 1975) dont les fluctuations reflètent assez bien, comme nous le verrons par la suite, celles de K_s.

Le débit d'exsudation D, la poussée radiculaire P et la pression osmotique de l'exsudat π_s se mesurent directement ; à partir de leurs valeurs, se calculent la conductivité globale K et le débit salin D_s. Cette démarche, nécessaire mais artificielle, ne doit pas faire oublier que les deux paramètres explicatifs restent K et D_s ; de ce fait, ils « commandent » les autres, notamment le débit d'exsudation D.

Dans la présentation des résultats, nous tiendrons compte de cet axe relationnel, en analysant les variations de D à partir de ses « composantes » K et D_s.

A. — *Généralités sur la cinétique des différents paramètres relatifs à l'exsudation après décapitation*

Les fluctuations des *débits d'exsudation* ont déjà été étudiées par différents auteurs notamment SPEIDEL (1939) et VAADIA (1960).

La cinétique des *poussées radiculaires* a également fait l'objet de travaux mais la technique utilisée — mesure par arrêt prolongé de l'exsudation — très différente de la nôtre, donne des résultats qui ne peuvent nous servir de références.

Enfin, l'étude de l'évolution des deux autres paramètres — *débits salins* et *conductivité racinaire* — n'a pas été faite jusqu'ici à notre connaissance.

L'examen des courbes caractérisant la cinétique de ces différentes composantes de l'exsudation après le sectionnement des tiges (fig. 1) nous permet de définir les possibilités d'interprétation et également le domaine de temps dans lequel les indications recueillies ont toutes chances de rester significatives.

Pour cette étude préliminaire, nous prenons en compte les données obtenues à partir de plantes placées sur solution nutritive complète T_1.

Des mesures rapprochées mettent en évidence une dépression passagère des débits d'exsudation une heure environ après la décapitation. Ensuite ces derniers augmentent durant 2 à 3 heures jusque vers midi, puis décroissent. La diminution temporaire des débits après le sectionnement a été également observée par VAKHMISTROV et ALI-ZADE (1973) qui imputent cet accident au traumatisme résultant de la décapitation.

La courbe des débits d'exsudation présente des caractéristiques qui dérivent de la cinétique des conductivités globales : dépression vers 9 heures, maximum à midi. Son allure générale décroissante est en rapport avec la diminution des débits salins au cours de la journée.

La chute des quantités de sels véhiculés par l'exsudat, en relation probable avec la diminution de l'absorption minérale, est à rapprocher de la diminution de l'activité métabolique de la racine provoquée par l'arrêt brutal de l'approvisionnement en assimilats, phénomène illustré par la décroissance de la respiration racinaire après la décapitation (communication personnelle de J. S. FROSSARD).

La dilution progressive de la sève qui en résulte explique l'allure décroissante de la courbe des poussées radiculaires.

Pour l'interprétation des résultats, compte tenu des observations précédentes, nous faisons uniquement état des résultats de la première journée, en retenant l'hypothèse probable qu'à ce stade, les répercussions du sectionnement ne portent que sur les valeurs absolues des grandeurs mesurées et ne modifient pas le sens des réponses de la plante aux différents facteurs qui sont testés.

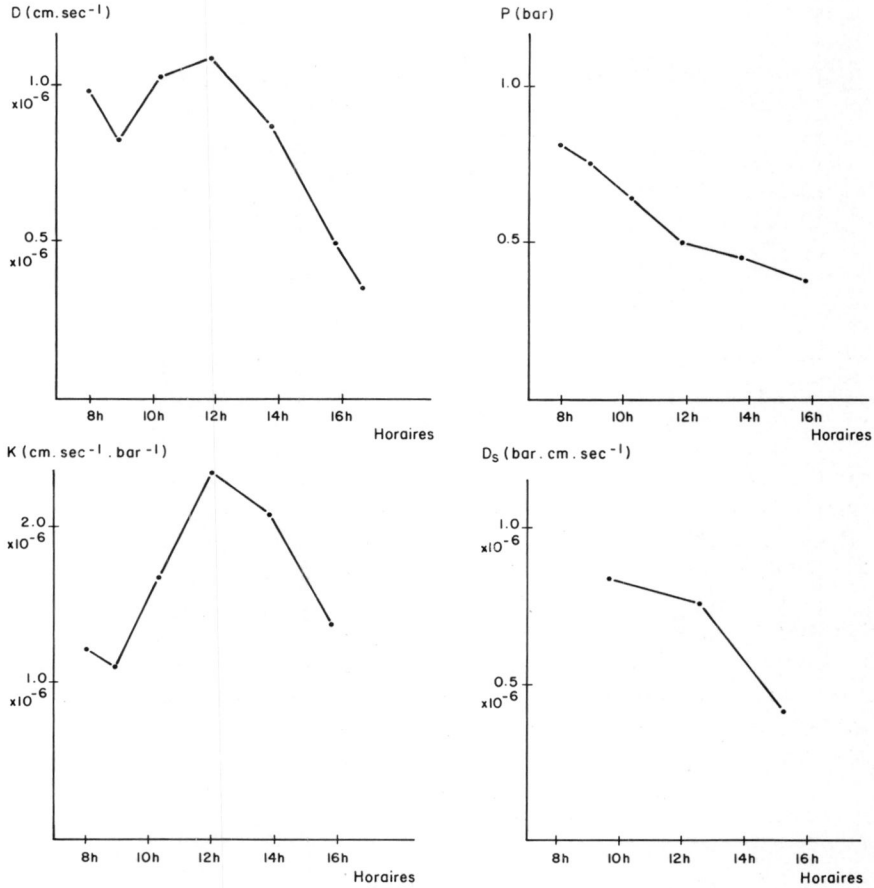


FIG. 1. — *Cinétique des différents paramètres de l'exsudation après la décapitation*

D : débit d'exsudation
P : poussée radiculaire
K : conductivité racinaire globale
D_s : débit salin

B. — *Alimentation totalement carencée* (traitement O)

Les débits d'exsudation ne représentent environ que le cinquième de la valeur de ceux des témoins (T). Le maximum de midi est peu marqué (fig. 2). Cette forte dépression résulte de la diminution simultanée des conductivités et des débits salins.

Les poussées radiculaires subissent également une forte diminution. La comparaison des pressions osmotiques des exsudats conduit à des conclusions analogues (tabl. 2). La faible concentration des sèves des plantes alimentées avec de l'eau

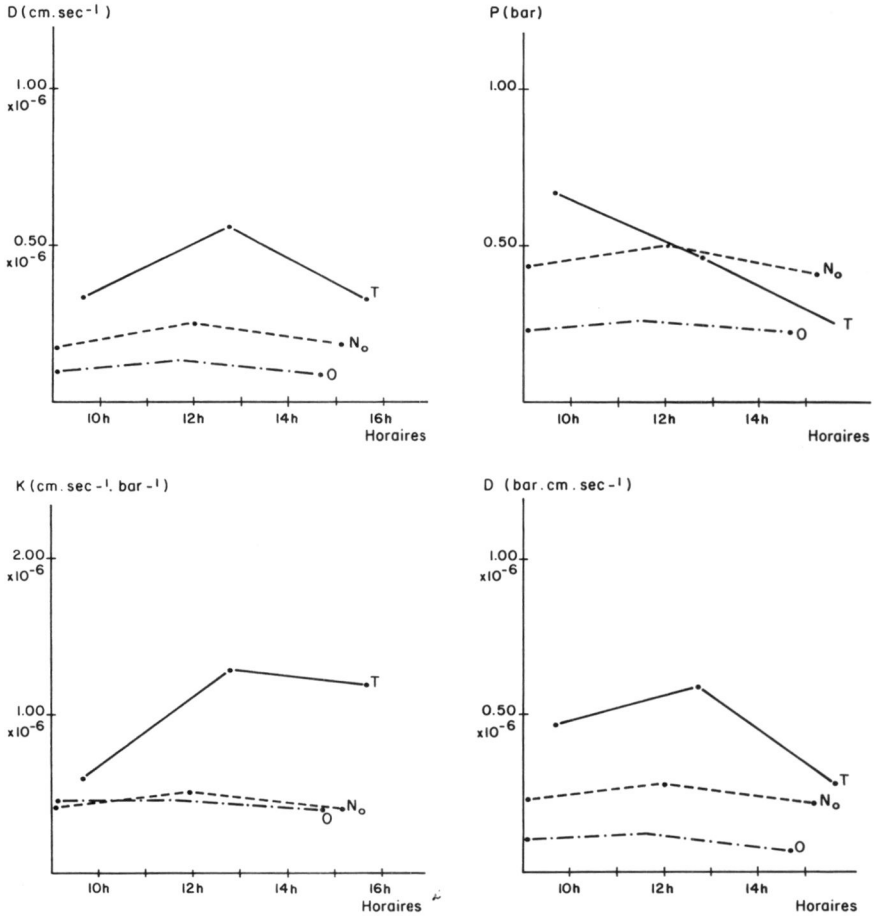


FIG. 2. — *Répercussions d'une alimentation carencée en azote* (N_0) *ou totalement carencée* (O) *sur les paramètres de l'exsudation*

TABLEAU 2

Pressions osmotiques des exsudats (bar)
comparaisons des traitements 0 et N_0 avec les témoins T

Horaire des observations	T	O	N_0
Entre 8 h 40 et 9 h 40 ...	1,43	0,96	1,38
Entre 11 h 40 et 12 h 40 .	1,05	0,90	1,13
Entre 14 h 40 et 15 h 40 .	0,84	0,77	1,21

entraînant une poussée radiculaire réduite, est évidemment en relation avec l'annulation de l'absorption minérale.

Les concentrations de tous les éléments diminuent, sauf celle du phosphore dont le comportement singulier peut s'expliquer par la libération des réserves après arrêt total de l'absorption minérale. Les débits des éléments chutent très nettement dans tous les cas (tabl. 3).

C. — *Alimentation carencée en azote* (traitement N_0)

1. *Traitement de courte durée.*

Les débits d'exsudation marquent également une diminution mais dans une proportion moindre ; leurs valeurs représentent environ la moitié de celles des témoins. Ceci est à mettre en parallèle avec une moindre réduction des débits salins, car les conductivités subissent, en effet, des réductions comparables à celles des plantes soumises à une carence totale (fig. 2).

L'action identique sur les conductivités de la carence totale et de la carence seulement azotée suggère que la nutrition azotée constitue, au moins à court terme, le principal facteur chimique de variation de la conductivité des membranes cytoplasmiques de la racine pour l'eau. Ces observations confirment des résultats déjà obtenus par MINGEAU (1969) et MINGEAU et ROBELIN (1972) sur plante entière de tournesol.

Les poussées radiculaires sont d'abord inférieures à celles des témoins ; elles s'en rapprochent ensuite progressivement et, l'après-midi, leur deviennent sensiblement supérieures (fig. 2). Ce phénomène est à rapprocher de l'évolution parallèle des pressions osmotiques des exsudats (tabl. 2). Ce comportement s'explique par le fait, comme nous le verrons dans la discussion, que les poussées radiculaires, comme les pressions osmotiques des exsudats, dépendent à la fois des conductivités racinaires pour l'eau et des débits salins.

Dans la composition de l'exsudat, les teneurs en azote marquent évidemment une chute importante. Par contre, les concentrations en P et en K augmentent. Les débits des éléments sont en général très déprimés sauf pour P et K dont la surconcentration assure le maintien à un niveau voisin de ceux des témoins (tabl. 3).

2. *Traitement à moyen et long terme.*

Le prolongement de la durée d'action de la carence se traduit par une accentuation du ralentissement des débits hydriques. Ainsi les débits moyens tombent à 28 p. 100 après 12 jours de carence et s'annulent au bout de 24 jours.

Il faut cependant noter une possibilité de remontée rapide des débits d'exsudation jusqu'au niveau des témoins, lorsque après une carence azotée de 12 jours, la solution complète est réintroduite.

D. — *Alimentation carencée en phosphore ou en potasse* (traitements P_0 ou K_0)

1. *Débits hydriques* (fig. 3).

Après 6 et 12 jours de *carence phosphorique*, la réponse en débit d'exsudation des P_0, au cours de la matinée et de l'après-midi, indique une faible dépression par

TABLEAU 3

Action d'une alimentation totalement carencée (O)
et d'une alimentation carencée en azote (N_0) *sur les concentrations C* (mg/l)
et les débits salins D_E ($mg \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$) *de chacun des éléments étudiés*

Horaire des prélèvements	Traitements	N (total)		N (nitrique)		P		K		Ca	
		C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$
8 h 35-11 h 20	Témoins	380	125	292	96	57	19	500	165	190	63
	Carencés totaux (0)	106	11	56	6	110	11	275	27		
	Carencés N (N_0)	56	9	30	5	103	18	690	117	246	42
11 h 20-14 h 40	Témoins	190	106	160	90	39	22	290	162	143	80
	Carencés totaux (0)	175	23	50	6	79	10	225	29		
	Carencés N (N_0)	84	21	24	6	88	22	600	150	204	51
14 h 40-17 h 45	Témoins	213	70	140	46	43	14	280	92	130	43
	Carencés totaux (0)			44	4	106	6	250	22		
	Carencés N (N_0)	66	12	20	4	96	17	585	105	167	30

rapport aux témoins ; cette action est par contre marquée (diminution de plus de 50 p. 100) lorsque les plantes ne reçoivent plus de phosphore depuis 24 jours. Les volumes relevés pendant la nuit sont peu affectés par la carence quelle que soit sa durée.

En conditions de *carence potassique*, l'action du traitement apparaît dès le premier contrôle par une augmentation du débit d'exsudation sur 24 heures (170 p. 100 des témoins) ; elle se maintient à cette valeur après 12 et 24 jours de carence.

Cependant cette augmentation globale au niveau de la journée à peu près identique pour les trois durées de carence, se répartit différemment au cours du temps si l'on considère séparément les trois fractions (fig. 3). Ainsi les contributions des sèves du matin et de l'après-midi à la variation globale observée diminuent progressivement du 6e au 24e jour alors que l'évolution inverse se produit pour la fraction nocturne.

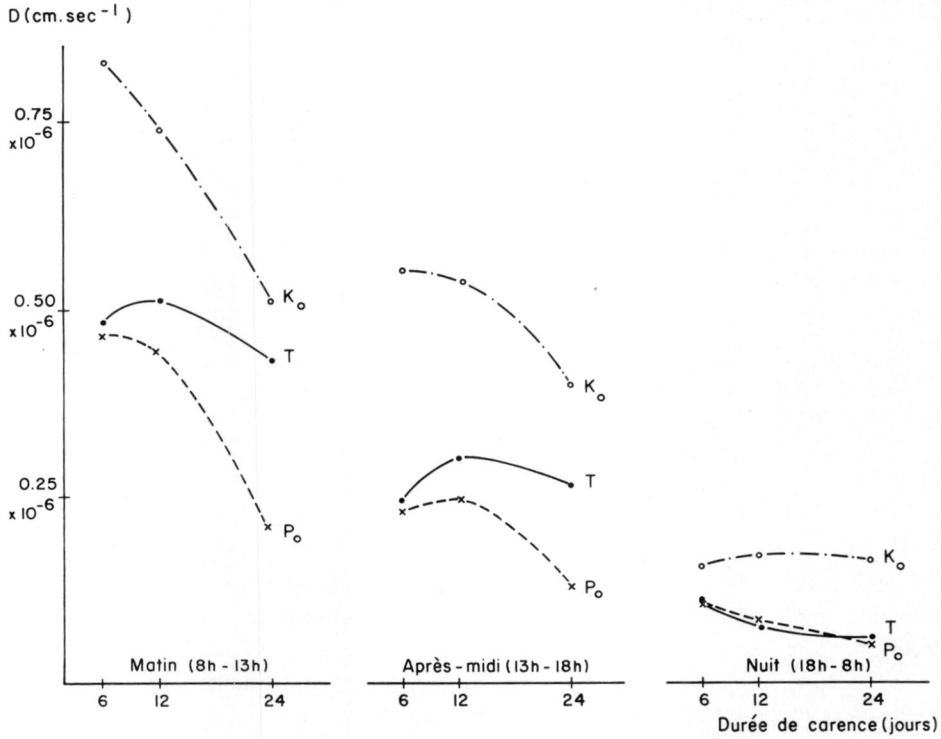


FIG. 3. — *Action sur D d'une alimentation carencée en P* (P_0) *ou d'une alimentation carencée en K* (K_0) *après 6, 12 et 24 jours de traitement*
(en ordonnée : débit d'exsudation exprimé en cm·sec⁻¹)

Des comportements identiques en carence potassique ont été mis en évidence par plusieurs auteurs ; SPEIDEL (1939) trouve une exsudation plus importante chez les plantes ne recevant qu'une alimentation potassique restreinte ; le phénomène résulterait, d'après cet auteur, du gonflement du protoplasme sous l'influence du potassium. VOLK (1944) et LUNDEGARDH (1943-1945) indiquent des tendances semblables mais avec des réponses d'intensité variable.

2. *Débits salins et conductivités racinaires. Essai de détermination.*

Les poussées radiculaires et les pressions osmotiques des exsudats n'ayant pas été déterminées au cours de ces derniers essais, nous ne pouvons pas calculer directement les débits salins et les conductivités racinaires.

Nous proposons de raisonner à partir des concentrations de sève qui, bien que calculées à partir d'analyses n'incluant pas tous les éléments chimiques, permettent assez bien de retrouver le rôle des différents paramètres explicatifs.

P_0. Les concentrations de la sève ne sont pas significativement différentes de celles des témoins (tabl. 4). Cela veut dire — comme nous le verrons plus loin — que si D_s et K_s varient (par rapport au témoin), ils varient tous les deux dans le même sens et dans les mêmes proportions. Or, jusqu'à 12 jours de carence, les débits salins se maintiennent au niveau de ceux du témoin ou leur sont légèrement inférieurs. Après 24 jours, un décrochage très net se manifeste.

TABLEAU 4

Estimation des concentrations et des débits salins à partir des éléments dosés

Concentrations et débits salins	Carences de 6 jours			Carences de 12 jours			Carences de 24 jours		
	Témoins	P_0	K_0	Témoins	P_0	K_0	Témoins	P_0	K_0
Concentrations des exsudats (meq/l)	25,87	25,08	27,30	29,76	30,87	30,20	38,35	40,73	20,11
Débits salins (meq · cm^{-2} · s^{-1}) × 10^{-9}	12,55	11,61	22,58	15,18	13,52	22,38	16,45	8,35	10,22

On peut en déduire que pendant 12 jours, les conductivités racinaires sont peu affectées, mais qu'au bout de 24 jours, elles ont diminué par rapport à celles des témoins.

K_0. Jusqu'à 12 jours, les concentrations ne sont pas touchées (tabl. 4). L'augmentation concomitante des débits salins irait alors de pair avec une croissance relative des conductivités racinaires.

Ensuite, après 24 jours de carence, les concentrations diminuent, les débits salins également. La persistance de débits hydriques plus élevés que ceux des témoins ne peut s'expliquer que par une conductivité racinaire accrue.

En résumé, la carence phosphorique entraîne à long terme une réduction des conductivités racinaires et des transports de sels ; par contre, la carence potassique agit d'abord rapidement par une croissance marquée de ces deux paramètres ; par la suite, les débits salins chutent alors que les conductivités racinaires se maintiennent à un niveau élevé (altération probable des structures cellulaires).

Ceci peut être illustré par les schémas de la figure 4.

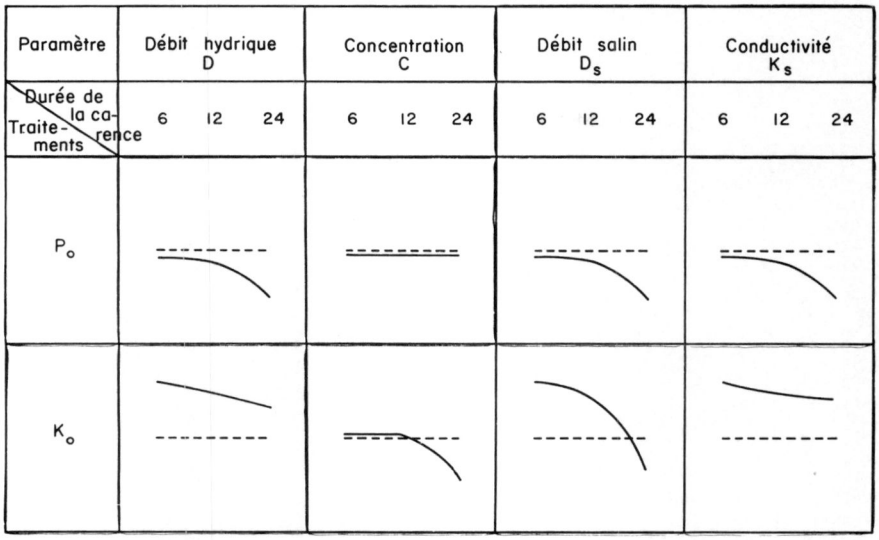


FIG. 4. — *Schéma indiquant les variations relatives* (—) *des paramètres de l'exsudation par rapport aux plantes témoins* (---) *pour les traitements* P_0 *et* K_0

3. *Composition de l'exsudat* (tabl. 5).

P_0. Quelle que soit la durée de la carence, les concentrations des différents éléments, sauf celles du phosphore, sont peu affectées.

Les débits des éléments au bout de 24 jours de carence, sont réduits approximativement dans la même proportion que les débits hydriques.

K_0. Jusqu'à 12 jours de carence, on observe une augmentation importante des concentrations en azote minéral (nitrique et ammoniacal). Le phénomène s'inverse par la suite. Un effet de dilution du phosphore se manifeste après 6 jours de carence.

Les débits des éléments marquent une augmentation importante par rapport à ceux des témoins, exception faite évidemment des débits de K.

E. — *Interaction : absorption hydrique-absorption minérale*

Au cours de cet essai, l'arrosage par solution nutritive complète est interrompu la veille des mesures à 17 heures. Pendant le reste de la journée et la nuit suivante, les plantes vivent sur les réserves de solution nutritive retenues par le sable. Le lendemain matin, dans un pot traité de cette façon, le sable est sec en surface et encore un peu humide en profondeur. Néanmoins, les plantes ne présentent aucun signe apparent de flétrissement.

Après le sectionnement des tiges, vers 8 h 30, trois parmi les six pots non irrigués au cours de la nuit, sont réalimentés en solution nutritive complète (traitement S_1), les trois autres étant arrosés à l'eau (plus polyéthylène-glycol) (traitement S_2). Ces plantes sont comparées à trois plantes témoins (T) qui ont été constamment arrosées avec de la solution nutritive complète.

TABLEAU 5

Action d'une alimentation carencée en phosphore (P_0) *et d'une alimentation carencée en potasse* (K_0) *sur les concentrations C* (mg/l) *et débits* D_E ($mg \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$) *de chacun des éléments étudiés* (exsudats du matin)

Nombre de jours de carence	Traitements	Éléments contrôlés									
		N (nitrique)		N (ammoniacal)		N (organique)		P		K	
		C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$
6	T	75	36,4	24	11,6	74	35,9	133	64,5	322	156,0
	P_0	91	42,1	25	11,6	76	35,2	51	23,6	352	163,0
	K_0	156	129,0	46	38,0	87	72,0	56	46,3	163	135,0
12	T	163	82,2	27	13,8	76	38,7	61	31,1	315	160,5
	P_0	184	80,6	34	10,5	61	26,7	25	10,9	407	178,0
	K_0	241	178,6	39	28,9	59	43,7	58	43,0	130	86,4
24	T	242	104,0	50	21,5	55	23,6	58	24,9	432	185,0
	P_0	296	60,6	60	12,3	33	6,8	7	1,4	478	98,0
	K_0	135	68,6	59	30,0	37	18,8	89	45,2	24	12,2

1. *Évolution des débits hydriques immédiatement après la reprise de l'irrigation* (fig. 5 *a*).

Dès la reprise de l'irrigation avec la solution complète ou avec de l'eau, l'exsudation augmente instantanément dans de fortes proportions. Ce fait reflète un effet hydrique plus qu'un effet minéral. En effet, s'il s'agissait d'abord d'un déficit d'absorption minérale, la solution nutritive non absorbée, retenue par le sable, aurait vu sa pression osmotique diminuer par épuisement. Dès lors, la réalimentation avec un liquide plus concentré (solution complète ou eau + P.E.G.) s'accompagnerait d'une dépression momentanée des débits, provoquée par le choc osmotique. Ce phénomène, décrit par ailleurs (Arisz *et al.*, 1951) apparaît très nettement si l'on remplace brutalement une irrigation à l'eau pure (pression osmotique nulle) par une irrigation avec la solution nutritive complète (pression osmotique = 0,4 bar) (fig. 5 *b*).

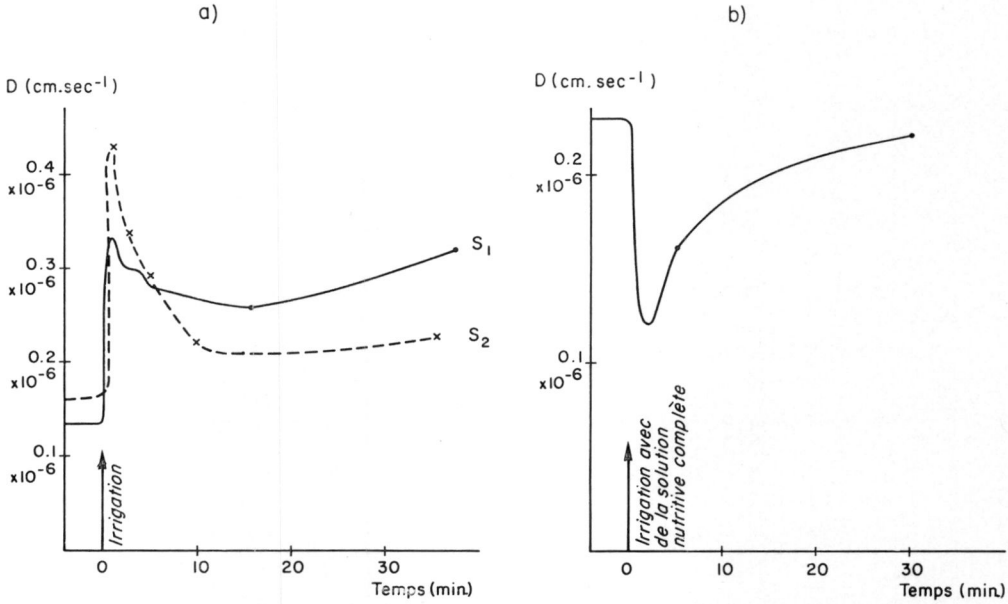


Fig. 5. — *Variation des débits d'exsudation lors de la remise en irrigation avec de la solution nutritive* (—) *ou de l'eau* (---) (courbes *a*). *Comparaison avec la réaction provoquée par le remplacement de l'eau pure par de la solution nutritive complète* (courbes *b*).

2. *Évolution ultérieure des caractéristiques de l'exsudation* (fig. 5 et 6).

Après l'élévation pratiquement instantanée des débits d'exsudation commune aux deux traitements S_1 et S_2, ceux-ci se différencient très vite.

Les poussées radiculaires et les débits salins de S_1 s'élèvent rapidement et dépassent même ceux des témoins l'après-midi. Les conductivités racinaires présentent la même tendance mais avec un certain décalage dans le temps (fig. 6).

Au contraire, pour S_2, entre la 2e et la 10e minute après la remise en irrigation, l'exsudation chute brutalement pour se stabiliser ensuite à un niveau un peu supérieur à celui observé avant la reprise de l'arrosage (fig. 5). De même, les valeurs des autres paramètres restent faibles (fig. 6).

L'interprétation de ces différents phénomènes :

— hausse initiale des débits de S_1 et S_2,

— dépassement des débits salins de T par ceux de S_1,

— chute de l'exsudation de S_2 suivant de près l'augmentation initiale, peut se faire de la façon suivante : l'arrêt de l'irrigation fertilisante a entraîné en premier lieu un déficit d'absorption minérale. Quand l'irrigation par solution nutritive est à nouveau assurée, la plante réagit d'abord à l'apport de l'eau, puis le déficit minéral accumulé pendant la nuit se traduit par une absorption saline accrue (comparaison T-S_1). Ce fait est à rapprocher des observations de LÉONARD et HANSON (1972) portant sur le doublement du taux d'absorption ionique par les racines de maïs ayant subi un lavage préalable à l'eau distillée. Par contre, dans le cas de S_2 après un premier effet hydrique, la carence minérale se traduit par une dépression de l'exsudation.

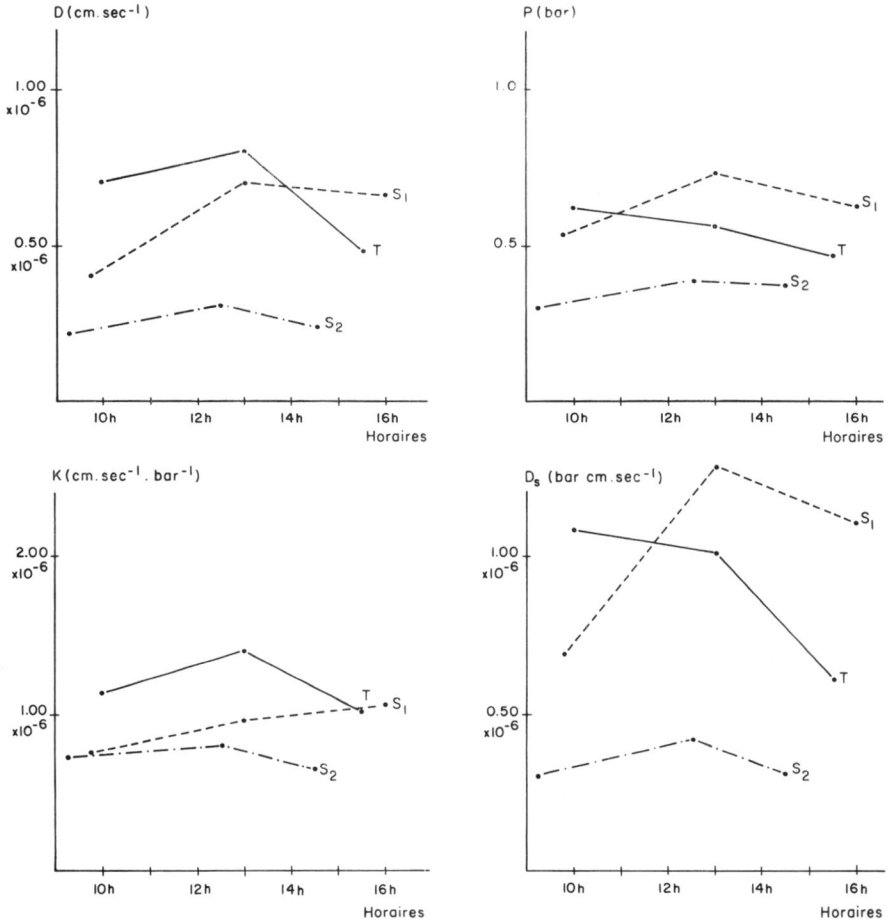


FIG. 6. — *Incidence sur les paramètres de l'exsudation d'un arrêt momentané de l'irrigation suivi d'une reprise*

— soit en solution nutritive complète (S_1)
— soit en eau pure (S_2)

III. — OBSERVATIONS GÉNÉRALES

Les résultats que nous venons de présenter, montrent les incidences que les facteurs nutritionnels peuvent avoir directement sur l'absorption hydrique et sur les composantes K et D_s de cette absorption dans le cas d'une plante décapitée. Ils peuvent également contribuer à une meilleure connaissance du fonctionnement de la racine en tant qu'organe de transfert de l'eau. A cet égard, nous discuterons des modalités de réponse à une carence minérale suivant trois directions :

— comportement distinct des deux voies empruntées par l'eau lors de l'absorption ;

— différenciation du temps de latence dans la réponse des deux paramètres K et D_s ;

— analyses des mécanismes d'une relative régulation de la concentration saline de l'exsudat.

1. — *Comportement distinct des deux voies empruntées par l'eau lors de l'absorption*

Nous avons déjà indiqué (MORIZET et ROBELIN, 1975) que la « conductivité racinaire globale » K représente la somme de la « conductivité racinaire sélective » K_s et la « conductivité racinaire libre » K_1 :

$$K = K_s + K_1 \tag{7}$$

Ces conductivités se rapportent respectivement à la voie sélective ou « intracellulaire » et à la voie libre ou « extracellulaire ».

A condition que certaines conditions soient remplies, les valeurs de K_s et de K_1 peuvent être calculées à partir des équations suivantes (MORIZET et ROBELIN, 1975) :

$$K_s = \frac{P}{\pi_s - \pi_e} K \tag{8}$$

$$K_1 = \left(1 - \frac{P}{\pi_s - \pi_e}\right) K \tag{9}$$

Il n'est pas sûr que les conditions détaillées dans le mémoire cité en référence, soient entièrement remplies, observation limitant évidemment le crédit que l'on peut accorder aux déterminations réalisées de cette façon.

Nous donnerons cependant les résultats des calculs effectués à propos des traitements : carence azotée et carence totale, d'abord parce qu'ils sont présentatifs d'une tendance constatée fréquemment, ensuite parce que les résultats paraissent assez cohérents et semblent justifier *a posteriori* les hypothèses formulées au départ.

Les carences totales ou seulement azotées diminuent plus fortement K_s que K_1 (tabl. 6).

Cette observation est générale. La conductivité de la voie sélective est beaucoup plus sensible que la conductivité de la voie libre aux variations des conditions du milieu. Elle confirme les résultats obtenus par MEES et WEATHERLEY (1957) qui ont

montré que « le coefficient de conductivité osmotique » est plus sensible aux facteurs externes que le « coefficient de conductivité de pression ».

Ces résultats traduisent le fait que les structures cellulaires jouant le rôle de barrière hémiperméable, c'est-à-dire les membranes cytoplasmiques, sont très sensibles aux variations des conditions du milieu. A l'opposé, les réponses plus amorties de la voie libre aux variations extérieures, rendent compte de l'inertie relative de ses caractéristiques physiques.

TABLEAU 6

Diminution relative de K_s et K_1 (en p. 100 des valeurs des témoins) *dans les cas :*

— soit d'une alimentation carencée en azote (N_0)
— soit d'une alimentation totalement carencée (O)

Horaire des observations	K_s		K_1	
	N_0	0	N_0	0
10 h	48	55	5	0
13 h	67	75	47	55

2. — *Différenciation du temps de latence dans la réponse des deux paramètres K et D_s*

Si l'alimentation minérale d'une plante est carencée en azote, ou si elle est totalement carencée, les poussées radiculaires (et les débits salins qui les déterminent en partie) sont affectées avant les conductivités racinaires.

Par exemple, après 10 heures d'une carence totale, les poussées radiculaires des plantes carencées ont déjà chuté d'une façon importante par rapport à celles des témoins. Par contre, les conductivités racinaires ne sont encore que très peu touchées (tabl. 7).

TABLEAU 7

Diminution relative des poussées radiculaires P et des conductivités racinaires globales K pour l'eau (en p. 100 des valeurs du témoin), *à la suite d'une alimentation totalement carencée* (O) *d'une durée de 10 heures*

Horaire des observations	P	K
10 h	44	6
13 h	27	5

On peut interpréter ces faits en disant qu'une nutrition minérale carencée a pour première conséquence évidente de ralentir (ou à la limite d'annuler pour une carence totale) l'absorption saline. La réduction initiale de l'exsudation a pour seule cause cette décroissance des débits salins.

La conductivité racinaire présente une inertie de réponse plus grande, due au délai nécessaire pour que les structures cellulaires responsables des résistances au transfert de l'eau, réagissent au changement d'alimentation minérale par une modification de leurs propriétés biophysiques.

3. — *Analyse des mécanismes d'une relative régulation de la concentration saline de l'exsudat*

La concentration saline de la sève est relativement indépendante des débits hydriques et relativement constante, pourvu que ces résultats aient été obtenus à peu près à la même heure. Les mesures effectuées entre 11 h 30 et 13 heures donnent pour π_s une moyenne de 1,05 bar ($\sigma = 0{,}11$ bar). Cette observation générale qui s'applique à des traitements fort différents peut s'analyser de la façon suivante :

La régulation de la concentration saline — se traduisant par une valeur constante de la pression osmotique π_s de l'exsudat — implique que le rapport $\frac{D_s}{K_s}$ soit lui-même constant, déduction qui ressort de l'équation :

$$\frac{D_s}{K_s} = \pi_s(\pi_s - \pi_e) \qquad (10)$$

obtenue en combinant les équations :

du débit d'exsudation : $D = K_s(\pi_s - \pi_e)$ (5)

et du débit salin : $D_s = D \cdot \pi_s$ (3)

Autrement dit, pour que π_s soit constant, il faut et il suffit que D_s et K_s varient dans le même sens et dans les mêmes proportions, ce que confirment bien les données expérimentales quand le traitement est appliqué depuis suffisamment longtemps, où l'on obtient la droite de régression : $K_s = 1{,}16\ D_s + 0{,}14$ (coefficient de corrélation = 0,74). A plus court terme, comme nous venons de le voir dans le paragraphe 2, la rapidité de réponse de chacun des paramètres peut être différente.

Cette règle est en liaison probable avec la dépendance des paramètres K_s et D_s vis-à-vis d'un facteur commun qui est l'activité métabolique de la racine, comme nous le montrerons dans un second mémoire. Mais elle n'est évidemment qu'approximative, une composante du milieu pouvant agir d'une façon plus intense soit sur les débits salins, soit sur les conductivités. Par exemple, l'alimentation totalement carencée pèse davantage sur D_s que sur K_s ; il en résulte une diminution de la pression osmotique des exsudats. Par contre, la valeur élevée de π_s et de la poussée radiculaire chez les plantes carencées en azote, observation couramment effectuée l'après-midi, peut s'expliquer par une action plus efficace du traitement sur les conductivités que sur les débits salins.

CONCLUSION

Le présent travail avait pour objet d'apporter quelques éléments de meilleure compréhension sur un sujet encore mal connu concernant d'une façon générale les relations entre l'alimentation minérale et l'alimentation hydrique, et plus précisément, l'influence de la nutrition minérale sur les possibilités de transfert de l'eau.

Nous l'avons abordé avec une méthode d'approche brutale mais l'introduction soudaine d'une carence nutritionnelle permet, mieux qu'une carence partielle et progressive, d'extérioriser les conséquences de cette carence. Nous avons également utilisé une technique d'observation qui, à côté d'inconvénients résultant de la décapitation, a l'avantage de rendre possible l'analyse du comportement de la racine dans sa fonction d'absorption et de transfert de l'eau. Ainsi les mesures quasi simultanées des débits d'exsudation et des poussées radiculaires permettent d'appréhender les niveaux d'action des facteurs nutritionnels sur l'absorption hydrique qui comprennent les conductivités racinaires et les débits salins.

La carence azotée se traduit par une augmentation des résistances à l'absorption de l'eau comme l'avaient déjà pressenti MINGEAU et ROBELIN (1972). La sensibilité de la racine à la carence potassique apparaît également très importante et va dans le sens du rôle « économiseur d'eau » attribué au potassium (BLANCHET, 1962). Par contre, les transferts de l'eau apparaissent beaucoup moins tributaires du phosphore.

La composition de la sève est modifiée par les différents traitements, mais tout se passe comme s'il existait une relative régulation de la concentration saline qui peut s'expliquer par les variations concomitantes et dans le même sens des débits salins et des conductivités.

Ces informations acquises dans le cas très particulier d'une plante décapitée, où seule agit l'absorption « active », ne sont pas entièrement transposables aux plantes entières. Quand il y a transpiration, la composante osmotique de potentiel hydrique qui assure l'absorption devient secondaire par rapport au potentiel de succion qui, lui, est commandé par l'intensité transpiratoire. Donc, les débits salins n'ont pas la même importance en tant que paramètre de l'absorption.

Par contre, la conductivité racinaire globale K garde toute sa signification (MORIZET et ROBELIN, 1975) et les observations formulées à propos de l'exsudation restent valables.

Reçu pour publication en mai 1976.

SUMMARY

THE EFFECT OF ENVIRONMENT ON WATER UPTAKE, AS STUDIED ON BEHEADED EXUDATING TOMATO. I. — THE ROLE OF NUTRIENTS

The present study was undertaken to investigate the effect of N, P, K nutrients on water uptake. It is based on data collected from exudating tomato plants. Measurements, in particular of the exudation flow, root pressure and osmotic pressure of the exudates made possible the calculation of root conductivity for water and salt flow.

Lack of nitrogen leads to an increased resistance to water uptake. Lack of phosphorus has a similar effect, although the symptoms appear more slowly. On the contrary, lack of potassium induces an easier water flow.

Moreover, the results obtained lead to some general observations, concerning in particular :

— the behaviour of the two pathways followed by water as a result of a change in nutrients,
— the differentiation of a latency period in the response of parameters K and D_s,
— the mechanisms of a fairly marked control of the salt concentration in the exudates.

On a beheaded plant, water transfers are dependant simultaneously on water conductivity of the roots and on salt flow.

However, on the whole plant, where the succion potential is the main factor affecting water uptake, the osmotic potential as related to salt flow does not have the same bearing on this process. On the contrary, root conductivity still plays an important part and the observations made on exudation still fit to the data.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER UMWELTEINFLÜSSE AUF DIE WASSERAUFNAHME VON ENTSPITZTEN AUSSCHWITZENDEN TOMATEN.

I. — ERNAHRUNGSFAKTOREN

Dieses Studium befasst sich mit der Wirkung von N, P, K Nährstoffen auf die Wasseraufnahme. Es stützt sich auf Angaben, die an ausschwitzenden Tomaten gesammelt worden sind. Die durchgeführten Messungen sollten nämlich die ausgeschwitzten Wassermenge, den Wurzeldruck und den osmotischen Duck ermitteln, und dadurch konnte die Wasser- und Salzeleitfähigkeit der Wurzel errechnet werden.

Stickstoffmangel äussert sich durch einen zunehmenden Widerstand gegen Wasseraufnahme Phosphormangel wirkt sich in einer ähnlichen Weise aus, doch treten die Erscheinungen langsamer auf Kalimangel im Gegenteil bedingt einen leichteren Wasserdurchfluss.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse wurde es ausserdem möglich, einige allgemeinen Bemerkurgen zu formulieren, nämlich über :

— Das Verhalten der zwei Wege des Wasserdurchflusses nach einer Veränderung der Pflanzennahrung,

— Die Differenzierung einer Latenzperiode in der Antwort der zwei Parameter K und D_s,

— Die Mechanismen einer gewissen Kontrolle der Salzkonzentration in den Exsudaten.

Auf einer entspitzten Pflanze ist der Wassertransport gleichzeitig von der Wasser- und Salzeleitfähigkeit der Wurzel abhängig.

Auf einer unverletzten Pflanze, wo das Saugungspotential die entscheidende Rolle in der Wasseraufnahme spielt, ist das osmotisches Potential, das mit dem Salzstrom verknüpft ist, nicht so bedeutungsvoll. Der Wurzelleitfähigkeit aber kommt immer noch eine grundsätzliche Bedeuntung zu, und die Anmerkungen über das Auschwitzen bleiben such noch gültig.

РЕЗЮМЕ

Влияние факторов среды на поглощенне влаги. Изучение плача обезглавленного растения томата. — I. Факторы питания.

Ж. МОРИЗЕ, М. МЕНЖО.

Данная работа посвящена изучению действия факторов питания N, P, K на поглощение влаги и основана на данных полученных при плаче обезглавленных растений томата. Измерены были режим плача, продвижение корневых волосков и осмотическое давление плача, что позволило рассчитать корневую проводимость воды и расход солей.

Недостаточность азота выражается увеличением сопротивления поглощенню влаги. Фосфорная недостаточность вызывает то-же явление, но симптомы его проявляются более медленно. Что-же касается калиевой недостаточности, она напротив, облегчает перенос влаги.

Полученные результаты позволяют, кроме того, сформулировать несколько общих замечаний по поводу :

— поведения двух путей продвижения влаги при изменении факторов питания;

— дифференцирования времени латентности ответа параметров K и D_s;

— механизмов относительной регуляции концентрации солей в плаче;

Переносы влаги в обезглавленном растении зависят в одно и то-же время от проводимости корней и расхода солей. В цельном растении, в котором потенциал всасывания является главной составной поглощения влаги, осмотический потенциал, находящийся в зависимости от расхода солей не представляет такого значения. Проводимость корней сохраняет, наоборот, всю свою важность и сформулированные по поводу плача заметки остаются действительными.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDEL O. M. van, 1953. The influence of salts on the exudation of tomato plants. *Acta bot. neerl.*, **2-4**, 445-521.

ARISZ W. H., HELDER R. J., VAN NIE R., 1951. Analysis of the exudation process in tomato plants. *J. Exp. Bot.*, **2-6**, 257-297.

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT Colette, 1962. Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes. *Ann. agron.*, **13** (2), 93-110.

BROUWER R. Water absorption by the roots of vicia faba at various transpiration strengths. I. Analysis of the uptake and the factors determining it, 1953. *Proc. Kon. nederl. Akad. Wetensch C 56*, 106-115. II. Causal relation between suction tension, resistance and uptake, 1953. *Ibid., C 56*, 129-136. III. Changes in water conductivity artificially obtained, 1954. *Ibid., C 57*, 68-80.

CURRIER H. B., 1944. Cryoscopy of amounts of expressed tissue sap. *Plant physiol.*, **19**, 544-550.

GINSBURG H., GINZBURG B. Z., 1970. Radial water and solute flow in roots of Zea Mays. I. Water flow. *J. Exp. Bot.*, **21-68**, 580-592.

GINSGURG H., GINZBURG B. Z., 1971. Radial water and solute flow in roots of Zea Mays. III. Effects of temperature on THO and ion transport. *J. Exp. Bot.*, **22-71**, 337-341.

LEFEBVRE J. M., JOLIET Élisabeth, 1967. Étude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du dactyle. *Ann. agron.*, **18** (5), 529-543.

LEONARD R. T., HANSON J. B., 1972. Induction and development of increased ion absorption in corn root tissue. *Plant physiol.*, **49**, 430-435.

LUNDEGARDH H., 1943. Blading and sap movement. *Ank of Bot.*, **31** A (2), 1-56 ; 1945. Absorption, transport and exudation of inorganic ions by the roots. *Ibid.*, **32** A (12), 1-139.

MEES G. C., WEATHERLEY P. E., 1957. The mecanism of water absorption by roots. I. Preliminary studies on the effects of hydrostatic pressure gradients. *Proc. Roy. Soc.*, **B 147**, 367-380. II. The role of hydrostatic pressure gradients across the cortex. *Ibid.*, **147**, 381-391.

MINGEAU M., 1969. Action de la nutrition minérale sur l'économie de l'eau dans la plante. I. Équilibre absorption-transpiration. *Ann. agron.*, **20** (3), 263-276.

MINGEAU M., ROBELIN M., 1972. Le transfert de l'eau dans la plante. Action particulière de la nutrition azotée. *Ann. agron.*, **23** (4), 419-427.

MORIZET J., ROBELIN M., 1972. La poussée radiculaire. Déterminations, mécanismes, implications. *Ann. agron.*, **23** (5), 479-496.

MORIZET J., ROBELIN M., 1975. Évaluation de la poussée radiculaire. Confrontation des résultats avec les données de la théorie osmotique. Calcul de la conductivité des racines pour l'eau. *Ann. agron.*, **26** (2), 125-137.

ROUTCHENKO W., 1967. Appréciation des conditions de la nutrition minérale des plantes basées sur l'analyse des sucs extraits des tissus conducteurs. *Ann. agron.*, **18** (4), 361-402.

SPEIDEL B., 1939. Untersuchungen zur Physiologie der Blutens bei höheren Pflanzen. *Planta*, **30**, 67-112.

STOKER R., WEATHERLEY P. E., 1971. The influence of the rate of transpiration and depression of leaf water potential. *New Phytol.*, **70**, 547-554.

VAADIA Y., 1960. Autonomic diurnal fluctuations in rate of exudation and root pressure of decapited sunflower plants. *Phys. Plant.*, **13**, 701-717.

VAKHMISTROV D. B., ALI-ZADE V. M., 1973. Kinetic analysis of the transient phase of bleeding sap secretion by the root system of sunflower. *Soviet Plant Phys.*, **20**, 205-212.

VOLK A., 1944. Einfluss der Ernährung auf Wurzeldruck, Blutung und Guttation. *Z. Pflanzenernähr.*, **35**, 190-204.

Ann. agron., 1976, **27** (2), 207-220.

VARIATIONS DES TENEURS EN ACIDES ORGANIQUES DE RACINES DE PLANTES SOUMISES A UN EXCÈS D'EAU

C. DUTHION
avec la collaboration technique de Josiane MORTIER

Station de Science du Sol,
Centre de Recherches de Dijon, I. N. R. A.,
7, rue Sully,
21034 Dijon Cedex

RÉSUMÉ

Douze espèces cultivées ont été soumises pendant une période donnée à un excès d'eau. Bien qu'aucune de ces espèces ne soit pleinement tolérante, de grandes différences de comportement existent entre elles. Les modifications, consécutives à la contrainte, que l'on observe dans l'évolution des teneurs en acides organiques des racines, suggèrent une possibilité d'adaptation métabolique. La mise en évidence d'un critère de sensibilité à l'ennoyage nécessite une étude plus particulière de quelques réactions enzymatiques (alcool déshydrogénase, enzyme malique).

INTRODUCTION

La présence d'un excès d'eau dans le sol résulte de conditions défavorables liées au sol lui-même, à la topographie, au climat. La réalisation de travaux d'assainissement ou de drainage permet souvent d'en éliminer ou d'en minimiser les inconvénients agricoles. Néanmoins, l'utilisation optimale des vastes surfaces concernées nécessite de connaître l'influence de l'excès d'eau sur les plantes, par l'étude du comportement des espèces mais aussi des mécanismes en cause dans ces comportements.

Plus ou moins rapidement, des signes de souffrance apparaissent sur la plante qui est soumise à un excès d'eau ; on observe d'abord le flétrissement des parties aériennes, puis leur jaunissement, assez semblable à celui qui se manifeste en certaines circonstances lorsque l'alimentation minérale est défectueuse. Ces symptômes sont donc peu caractéristiques, mais dénotent des troubles, au moins dans les trans-

ferts hydriques et la nutrition, ceux-ci confirmés par des modifications de la composition minérale (LEYSHON et SHEARD, 1974). Ils traduisent des désordres au niveau de l'activité racinaire (KRAMER, 1951).

On a attribué une grande partie des dégâts observés (PÉRIGAUD, 1967) à la présence physique de l'eau (ou à la substitution d'un milieu ne comprenant plus que deux phases au milieu constitué des trois phases solide, liquide et gazeuse). Pour la plupart des auteurs, cependant, le défaut d'oxygénation du milieu racinaire, consécutif à l'ennoyage, est le facteur principal qui influe sur les cultures, quelquefois indirectement aussi par ses conséquences sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol. On constate effectivement une inhibition très rapide de la respiration racinaire (FULTON *et al.*, 1964). Les désordres qui touchent d'autres voies du métabolisme, l'absorption des éléments minéraux ou de l'eau sont des effets plus tardifs.

L'anoxie provoque une accélération de la glycolyse par la voie d'Embden-Meyerhof, qui résulte vraisemblablement de la disponibilité accrue en phosphate et ADP, alors que la formation d'ATP par phosphorylation oxydative est interrompue (YEMM, 1965). La décarboxylation du pyruvate produit est orientée, de façon prédominante, vers la formation d'acétaldéhyde, lui-même réduit ensuite pour donner de l'éthanol ; ce dernier, mis en évidence chez plusieurs espèces, plus particulièrement chez la Tomate (BOLTON et ERICKSON, 1970 ; FULTON et ERICKSON, 1964), est toxique pour la plante et peut être la cause immédiate des symptômes de souffrance. Dans le même temps, l'activité de la voie des pentoses-phosphates diminue (EFFER et RANSON, 1967 *a*, *b*), avec des conséquences probables sur la synthèse des nucléotides.

Ainsi, la dégradation oxydative du pyruvate, par l'intermédiaire du cycle de l'acide citrique, est ralentie ou interrompue ; les acides organiques, qui constituent les substrats des différentes étapes de ce cycle et sont des métabolites importants, précurseurs de nombreuses synthèses, ne sont plus renouvelés. EFFER et RANSON (1967 *a*) ont montré, sur des plantules de sarrasin, que certaines des réactions du cycle de l'acide citrique peuvent néanmoins se poursuivre, au début de la période d'anoxie, par couplage avec des réactions de réduction cellulaires. Seule l'oxydation du succinate est très rapidement bloquée, car il n'y a pas de régénération oxydative du groupement prosthétique de la succinodéshydrogénase en l'absence d'oxygène. C'est l'une des origines vraisemblables de l'augmentation de teneur en succinate ; celle-ci reste cependant limitée, ce qui peut être lié à la formation accrue de γ-aminobutyrate, par décarboxylation du glutamate, notée par plusieurs auteurs (FULTON *et al.*, 1964 ; STREETER et THOMPSON, 1972). La teneur en malate diminue immédiatement, bien que lentement, alors qu'il y a une légère augmentation initiale de la teneur en citrate.

Cependant, l'accélération de la glycolyse par la voie d'Embden-Meyerhof, consécutive à l'anoxie, ne semble pas se faire avec la même intensité pour toutes les espèces, ni l'évolution globale des teneurs en acides organiques suivre un schéma unique. CRAWFORD et TYLER (1969), comparant quelques espèces spontanées soumises à une période d'excès d'eau, ont mis en évidence des différences, entre plantes tolérantes et non tolérantes, qui portent notamment sur l'évolution du malate dans les racines.

Cette approche paraît donc une voie intéressante. Nous avons cherché, dans une première étape, à saisir, de la même façon, les variations, induites par la présence

d'un excès d'eau dans le sol, des teneurs en quelques acides organiques (citrique, malique, succinique...) dans les racines d'espèces cultivées, choisies en fonction de leurs comportements différenciés.

MÉTHODES ET TECHNIQUES

1. — *Les espèces*

L'étude a porté sur les espèces suivantes : Blé (*Triticum vulgare* L., lignée C.26. II Clermont-Ferrand), Épinard (*Spinacia oleracea* L., cv. [1] Vicking), Féverole (*Vicia faba* L., cv. Ascott), Lin (*Linum usitatissimum* D., cv. Clara), Maïs (*Zea mays* L., cv. LG II), Moutarde noire (*Sinapis nigra*), *Pelargonium zonale* L. (cv. à grandes fleurs roses obtenu par multiplication d'une bouture), Pétunia (Pétunias hybrides à fleurs simples), Sorgho (*Sorghum vulgare sudanense*, cv. Trudan I), Tabac (*Nicotiana tabacum* L., cv. Xanthi n.c.), Tomate (*Lycopersicum esculentum* MILL, cv. Montfavet 63-5), Tournesol (*Helianthus annuus* L., cv. Issanka).

Ces espèces diffèrent sensiblement par leurs caractères botaniques, physiologiques et culturaux ; leur choix était fondé, en outre, sur les données dont nous disposions, à travers la littérature ou par des observations isolées, à propos de leurs comportements au cours de l'ennoyage.

Dans un essai parallèle, mené dans les mêmes conditions que l'essai principal (cf. ci-dessous), nous avons .cherché à apprécier les tolérances relatives à l'ennoyage de ces espèces, en utilisant plusieurs indices, considérés ensemble ou séparément :

— variations pondérales, relativement aux plantes témoins de la même espèce, pendant la période d'ennoyage ;
— rapidité d'apparition des symptômes (flétrissement, jaunissement des parties aériennes, nécroses racinaires) sous l'effet de l'excès d'eau ;
— aggravation et extension des symptômes.

Nous avons ainsi pu classer les espèces étudiées en trois groupes, alors qu'aucune n'est pleinement tolérante :

— *1er groupe : espèces très peu tolérantes* (Épinard, Moutarde, Pétunia, Tabac, Tomate) Dans nos conditions expérimentales, les symptômes, traduisant les effets de l'excès d'eau, apparaissent et s'étendent rapidement, l'augmentation de masse (en matière sèche) après 10 jours d'ennoyage ne représente au mieux que 40 p. 100 de celle des plantes témoins pendant la même période.

— *2e groupe : espèces moyennement tolérantes* (Blé, Féverole).

— *3e groupe : espèces plus tolérantes* (Lin, Maïs, Pélargonium, Sorgho, Tournesol) chez lesquelles l'apparition des symptômes, parfois, mais surtout leur extension se font plus lentement et l'augmentation de masse, par rapport aux plantes témoins, demeure, après 10 jours d'ennoyage, supérieure à 70 p. 100.

2. — *Cultures*

Les cultures ont été faites au cours des printemps et étés (1972, 1973) sous serre à toit ouvrant, donc dans les conditions climatiques ambiantes. Après germination, les plantes ont été placées sur sable quartzeux, en bacs plastiques drainés de 15 litres ; la densité de plantation, variable, tenait compte du développement prévisible de l'espèce.

L'alimentation hydrique et minérale, automatisée, était assurée à l'aide d'une solution nutritive complète.

3. — *Traitement et prélèvements*

L'ennoyage est réalisé par apport de solution nutritive diluée, jusqu'au niveau supérieur du sable. La solution diluée est renouvelée en continu par le fond du bac ; son remplacement est complet une fois toutes les 24 heures. Cette technique permet de limiter certains effets secon-

[1] cv. = cultivar

daires de l'ennoyage, dus à l'accumulation de CO_2, et des produits de réduction, sans modifier les conditions d'oxygénation du milieu racinaire. La dilution de la solution nutritive est telle que les plantes en excès d'eau reçoivent la même alimentation minérale journalière que les plantes témoins ; en outre elle assure aux racines un environnement ionique comparable à celui qui serait dû à une « solution du sol », selon les données généralement acceptées (BARBER, 1962 ; BLANCHET, 1965).

Le traitement excès d'eau est appliqué au début de la floraison (début épanouissement de la première inflorescence), ou, pour les Graminées, à l'apparition de l'inflorescence (panicule mâle pour le Maïs). Cette période nous a en effet paru favorable à la mise en évidence d'éventuelles modifications métaboliques, puisque l'activité racinaire y est considérée comme maximale.

Les prélèvements, en fonction du temps, sont faits lorsque les réactions des plantes deviennent apparentes ; ce procédé introduit sans doute une certaine hétérogénéité d'une espèce à l'autre, mais permet de suivre plus étroitement les comportements. Les prélèvements ont toujours lieu dans la matinée et, dans la mesure du possible, aux mêmes heures. Ils concernent à chaque fois un bac témoin et un bac traitement. Pour plusieurs espèces, le prélèvement prévu au départ de l'essai (temps 0) n'a pas pu être fait.

Les racines sont séparées par un lavage rapide sous l'eau, à la température ordinaire, puis rincées à l'eau bipermutée. Les régions abîmées sont éliminées.

Une partie représentative (25 à 50 g en poids frais selon l'importance de la masse racinaire) est fixée dans l'éthanol (96°GL) bouillant. Le taux de matière sèche est déterminée sur une autre partie aliquote, par séchage à l'étuve à 105°C.

4. — *Extraction et analyse des acides organiques non cétoniques*

Après filtration de l'éthanol, le matériel végétal fixé est broyé finement et les composés solubles extraits dans les conditions décrites par JOLIVET (1968).

Une partie aliquote de l'extrait hydroalcoolique ainsi obtenu, correspondant à un poids de matière fraîche de 10 grammes, est passée sur une colonne de résine cationique Dowex 50-WX-8 (20-50 mesh) forme H^+, qui retient les acides aminés libres.

L'effluent, qui contient les anions organiques et minéraux à l'état libre, est titré par la soude jusqu'à pH = 8,6 (acidité totale), puis est passé sur une colonne de résine anionique Amberlite I.R.A. 400 (20-50 mesh) forme CO_3^{--}. Les anions fixés sont élués par une solution de carbonate d'ammonium à 5 p. 100. L'excès de carbonate d'ammonium de l'éluat est éliminé dans un évaporateur rotatif, sous pression réduite ; le résidu contenant les sels ammoniacaux des acides est amené à sec sous air comprimé.

Les acides organiques sont déterminés par chromatographie de partage sur colonne de gel de silice, selon la méthode de BOVÉ et RAVEUX (1957) légèrement modifiée par JOLIVET (1968). Ils sont enfin identifiés par chromatographie unidimensionnelle sur couche mince (MOROT-GAUDRY *et al.*, 1972).

RÉSULTATS

A l'exception de ceux qui sont présentés pour le Maïs et la Féverole dont quelques échantillons n'ont pu être dosés à la suite d'incidents au cours des fractionnements, les résultats rassemblés dans les tableaux 1 à 3 concernent les prélèvement effectués entre 0 et 10 jours de traitement. Au-delà de ce temps, des racines d'un type nouveau sont émises par quelques-unes des espèces (phénomène secondaire d'adaptation) ; auparavant elles sont toujours peu nombreuses.

Les résultats sont donnés par rapport à la matière fraîche. Nous avons conservé ce mode habituel d'expression malgré les différences d'hydratation, quelquefois assez grandes, entre les tissus des plantes témoins et les tissus des plantes ennoyées (hydratation généralement plus faible de ces derniers) ; le sens des comparaisons n'en est pas faussé.

La méthode de chromatographie de partage sur gel de silice que nous avons

TABLEAU I

Variations des teneurs en acides (µeq/g de matière fraîche) *dans les racines d'espèces très peu tolérantes à l'excès d'eau*

Espèces	Épinard				Moutarde noire						Pétunia			
Traitement	Témoin		Excès d'eau		Témoin			Excès d'eau			Témoin		Excès d'eau	
Durée traitement	0 j	4 j	0 j	4 j	3 j	7 j	10 j	3 j	7 j	10 j	3 j	6 j	3 j	6 j
Acidité totale	90,5	99,5	90,5	100,7	81,2	83,0	87,7	66,5	60,2	57,5	77,7	58,3	53,7	22,0
Acidité minérale	66,6	70,2	66,6	60,1	35,7	38,2	39,1	25,3	20,2	17,4	57,3	37,7	13,8	2,8
Acidité organique	23,9	29,5	23,9	40,6	45,5	44,8	48,6	41,2	40,0	40,1	20,4	20,6	39,9	19,2
Ac. succinique	0,7	0,7	0,7	3,8	1,9	1,9	1,4	2,7	2,7	2,6	1,5	1,3	1,8	1,3
Ac. malique	1,5	1,6	1,5	1,1	22,2	27,1	28,5	16,3	12,9	12,1	1,9	1,9	1,8	0,7
Ac. citrique + isocitrique	7,1	10,0	7,1	10,5	9,7	11,3	14,1	14,1	17,0	14,6	10,4	10,3	8,2	9,4

Espèces	Tabac						Tomate					
Traitement	Témoin			Excès d'eau			Témoin			Excès d'eau		
Durée traitement	2 j	3 j	4 j	2 j	3 j	4 j	2 j	3 j	6 j	2 j	3 j	6 j
Acidité totale	89,0	93,2	99,0	58,0	55,0	25,2	80,3	76,0	74,5	67,5	65,0	56,7
Acidité minérale	61,1	61,4	64,3	33,1	32,1	5,2	51,6	42,1	43,8	38,3	37,3	22,8
Acidité organique	27,9	31,8	34,7	24,9	22,9	20,0	28,7	33,9	30,7	29,2	27,7	33,9
Ac. succinique	1,2	1,2	1,2	2,2	2,1	1,5	1,8	2,9	2,6	3,6	3,2	3,3
Ac. malique	9,9	12,2	11,5	7,2	5,8	2,2	10,4	11,5	12,3	8,1	9,2	9,4
Ac. citrique + isocitrique	10,1	11,9	13,9	9,6	9,7	10,4	12,8	12,1	10,3	8,5	7,4	9,3

TABLEAU 2

Variations des teneurs en acides (µeq/g de matière fraîche) *dans les racines d'espèces moyennement tolérantes à l'ennoyage*

Espèces	Blé						Féverole					
Traitement	Témoin			Excès d'eau			Témoin			Excès d'eau		
Durée traitement	0 j	7 j	11 j	0 j	7 j	11 j	8 j	10 j	14 j	8 j	10 j	14 j
Acidité totale	82,0	83,5	90,7	82,0	72,0	68,7	108,0	115,5	114,7	78,5	72,5	93,2
Acidité minérale	62,9	—	67,9	62,9	56,0	56,7	77,6	—	58,0	41,5	35,7	48,6
Acidité organique	19,1	—	22,8	19,1	16,0	12,0	30,4	—	56,7	37,0	36,9	45,6
Ac. succinique	1,1	1,3	1,1	1,1	1,9	0,3	0,9	0,6	1,1	2,2	2,9	3,9
Ac. malique	4,9	5,8	5,1	4,9	2,8	0,5	15,9	—	26,4	13,0	11,9	10,3
Ac. citrique + isocitrique	6,6	—	7,8	6,6	5,1	7,6	7,4	11,8	19,3	13,9	17,1	22,1

TABLEAU 3

Variations des teneurs en acides (µeq/g de matière fraîche) *dans les racines d'espèces relativement tolérantes à l'excès d'eau*

Espèces	Lin						Maïs				Pélargonium					
Traitement	Témoin			Excès d'eau			Témoin		Excès d'eau		Témoin			Excès d'eau		
Durée traitement	0 j	5 j	9 j	0 j	5 j	9 j	5 j	19 j	5 j	19 j	0 j	4 j	7 j	0 j	4 j	7 j
Acidité totale	99,2	115,0	108,5	99,2	100,5	99,7	97,5	100,0	88,5	59,8	85,8	91,2	92,2	85,8	87,5	81,7
Acidité minérale	—	94,1	82,7	—	73,0	56,3	59,3	57,5	61,5	11,1	67,8	81,2	75,2	67,8	70,9	59,7
Acidité organique	—	20,9	25,8	—	27,5	43,4	38,2	42,5	27,0	48,7	18,0	10,0	17,0	18,0	16,6	22,0
Ac. succinique	0,3	1,0	1,2	0,3	1,4	2,5	0,6	1,0	1,7	1,4	0,8	0,7	0,7	0,8	1,1	1,9
Ac. malique	4,2	5,3	6,0	4,2	6,5	12,5	3,6	4,0	3,9	6,2	6,1	3,7	3,3	6,1	4,3	6,7
Ac. citrique + isocitrique	—	11,3	12,7	—	13,2	19,9	15,7	9,8	15,6	12,3	6,3	2,2	2,2	6,3	2,7	3,1

Espèces	Sorgho						Tournesol			
Traitement	Témoin			Excès d'eau			Témoin		Excès d'eau	
Durée traitement	3 j	7 j	10 j	3 j	7 j	10 j	4 j	10 j	4 j	10 j
Acidité totale	99,0	91,8	102,7	86,5	73,7	68,2	97,7	86,4	88,7	68,8
Acidité minérale	70,7	—	79,0	53,8	36,7	42,7	75,2	66,4	59,0	27,1
Acidité organique	28,3	—	23,7	32,7	37,0	25,5	22,5	20,0	29,7	41,7
Ac. succinique	1,0	1,1	1,0	1,6	1,2	1,4	1,2	1,2	3,0	4,0
Ac. malique	4,5	4,9	3,8	6,0	4,5	4,0	7,2	5,0	9,3	7,5
Ac. citrique + isocitrique	10,9	12,6	9,2	13,1	12,9	10,0	3,7	5,7	11,2	15,4

utilisée ne permet pas de séparer les acides succinique et lactique ; or ce dernier a été identifié dans quelques échantillons où il se trouve à l'état de traces. Par ailleurs la fraction citrique + isocitrique comporte toujours une impureté, dans une proportion difficile à évaluer ; il s'agit d'acidité minérale (RAVEUX et BOVÉ, 1957), ions nitrates vraisemblablement.

Une courte période d'ennoyage provoque, sauf chez le Lin et l'Épinard, une diminution de l'acidité totale dans les extraits hydroalcooliques des racines. Chez toutes les espèces, l'acidité minérale, obtenue par différence entre l'acidité totale titrée et l'acidité organique dosée, décroît ; les teneurs en acide succinique augmentent.

Parmi les espèces de même sensibilité à l'excès d'eau, on constate des évolutions assez différentes de la composition globale en acides organiques ; ses variations sont souvent moindres que celles de l'acidité minérale, mais elle décroît pourtant assez nettement chez quelques-unes des espèces parmi les plus sensibles.

Les teneurs en acides citrique et isocitrique augmentent beaucoup chez les espèces oléagineuses, et davantage dans les plantes ennoyées que dans les plantes témoins ; chez les autres espèces, les variations de ces teneurs sont relativement peu importantes et ne traduisent aucune tendance apparente. Par contre, les teneurs en acide malique dans les racines des plantes ennoyées, après quelques jours de traitement, sont toujours inférieures aux teneurs des plantes témoins pour les espèces qui constituent les groupes les plus sensibles ; elles sont du même ordre ou supérieures pour les espèces relativement tolérantes.

DISCUSSION

Les conditions réalisées dans cette expérimentation ne sont pas celles de l'anoxie stricte, mais plutôt d'une hypoxie. L'ennoyage abaisse la teneur en oxygène dans le sol à un niveau très faible ; ce défaut d'oxygénation du milieu provoque des troubles profonds de l'activité des racines.

La destruction des structures racinaires (HIATT et LOVE, 1967), entraînant le passage de composés solubles dans le milieu, ne peut donner d'explication même partielle des résultats présentés.

La diminution de l'acidité minérale dans les racines des plantes ennoyées est souvent très forte ; on sait les liens qui existent entre l'absorption des ions et le métabolisme racinaire, en particulier le métabolisme respiratoire (HELLER, 1974).

Les variations plus modérées de l'acidité organique sont dues pour la plus large part aux quatre acides détaillés dans les tableaux 1 à 3 ; il y a cependant quelques exceptions, comme pour l'Épinard ou le Maïs, chez lesquels on observe de fortes variations des acides qui leur sont caractéristiques, respectivement l'acide oxalique et l'acide aconitique.

D'autres supports que l'oxygène peuvent servir d'accepteurs d'électrons dans la décarboxylation oxydative du citrate. Ce fait permet d'interpréter les diminutions de teneur en citrate. Cependant, celles-ci ne s'observent que chez quelques espèces ; il faut donc vraisemblablement invoquer aussi d'autres filiations à l'accumulation, très générale, du succinate.

L'évolution des teneurs en acide malique dans les racines des plantes ennoyées est différente selon la sensibilité à l'excès d'eau que manifestent les espèces étudiées. Quelques exemples pris dans les deux groupes extrêmes de comportement permettent d'esquisser un schéma explicatif. Les principales étapes métaboliques concernées sont rappelées dans la figure 1.

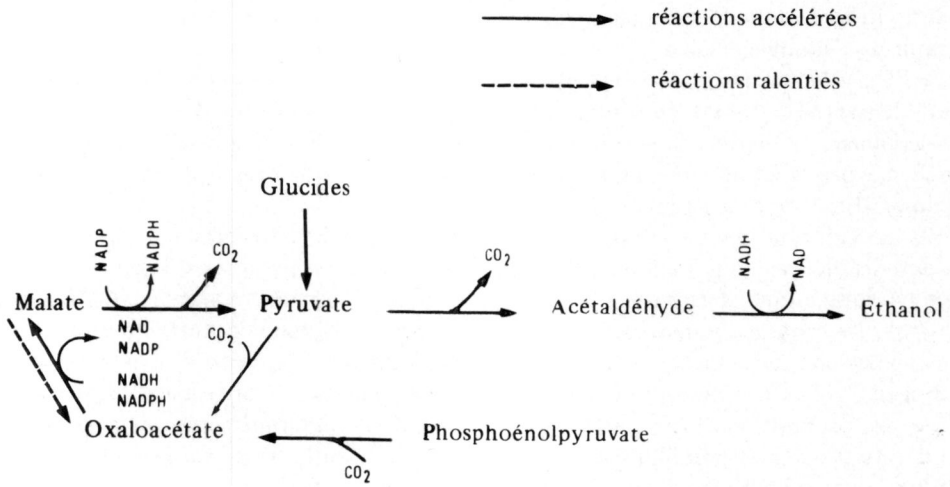


FIG. 1. — *Schéma hypothétique du déroulement des réactions dans les tissus ennoyés* (espèces très peu tolérantes)

La teneur en malate des racines du Tabac ou de la Moutarde diminue rapidement au cours de l'ennoyage. Le malate disparaît vraisemblablement par décarboxylation sous l'action de l'enzyme malique ; le pyruvate formé participe, comme le pyruvate qui provient de la dégradation des glucides (il y aurait d'ailleurs accélération de la glycolyse par la voie d'Embden-Meyerhof) à l'accumulation d'éthanol, toxique pour la plante. La régénération du malate, par l'intermédiaire de la carboxylation du phosphoénolpyruvate (MAZELIS et VENNESLAND, 1957), ne permet pas d'en maintenir le niveau dans la cellule, car la vitesse de décarboxylation l'emporte nettement, ainsi que cela a été démontré dans les tubercules de pomme de terre traités à la Rindite (JOLIVET, 1969). Par contre, chez la Tomate, pour laquelle le schéma reste certes applicable dans son ensemble, la diminution modérée des teneurs en malate dans les plantes ennoyées, alors qu'elles augmentent dans les plantes témoins, suggère que décarboxylation du malate et carboxylation du phosphoénolpyruvate tendent globalement à s'équilibrer dans les premiers jours de l'ennoyage.

La formation de malate à partir du phosphoénolpyruvate sous l'action de la PEP carboxylase, puis sa décarboxylation directe par l'enzyme malique semblent intervenir dans le métabolisme normal des racines du Maïs (TING et DUGGER, 1967 ; DANNER et TING, 1967). L'ennoyage y induit, comme chez les espèces précédentes, une activité accrue de l'alcool déshydrogénase (MARSHALL *et al.*, 1973). La tolérance relative du Maïs à l'excès d'eau, constatée dans nos essais, peut donc vraisemblablement s'expliquer de la façon suivante : la carboxylation du phosphoénolpyruvate est inhibée par le niveau de malate et, peut être, la décarboxylation du malate

même (TING, 1968) ; celle-ci n'est, de toute façon, pas accélérée à la suite de l'ennoyage. D'autre part, la vitesse de la glycolyse (voie Embden-Meyerhof) pourrait être également peu modifiée.

Chez le Tournesol et, plus encore, le Lin, on observe une accumulation modérée de l'acide malique. Elle provient de la carboxylation du phosphoénolpyruvate, alors que l'activité de l'enzyme malique est nulle ou faible. L'activité de l'alcool déshydrogénase doit être également réduite ; elle n'est pas accélérée dans les conditions de l'ennoyage.

Un schéma, tout à fait comparable, à celui qui a été proposé par MCMANMON et CRAWFORD (1971), en tant qu'interprétation métabolique de la tolérance à l'ennoyage, se dégage de ces exemples. Il présente également des analogies avec le schéma des réactions qui interviennent dans des baies de raisin placées en anaérobioses (FLANZY *et al.*, 1971).

L'évolution des teneurs en acide malique traduit, en réalité, la présence ou l'activité de l'enzyme malique. Mis en évidence dans de nombreux végétaux (TING et DUGGER, 1965 ; DITTRICH *et al.*, 1973) et dans des organes variés (GARCIA *et al.*, 1974), l'enzyme malique serait donc l'un des facteurs d'une adaptation métabolique à l'ennoyage ; celle-ci dépendrait également du niveau d'activité de l'alcool déshydrogénase. Les résultats présentés ne peuvent évidemment suffire à établir la valeur de ces propositions. En particulier, les réactions impliquées ne sont possibles qu'autant que la disponibilité en nucléotides est suffisante, ce qui suppose le maintien d'une certaine activité de la voie des pentoses-phosphates.

Il importe donc de confirmer le comportement à l'ennoyage et les réponses métaboliques globales des espèces ; dans ce but, quatre espèces parmi les plus sensibles (Moutarde et Tabac) et les plus tolérantes (Maïs et Tournesol) de celles qui ont été utilisées dans ce premier travail, ainsi que le Riz, sont soumises à nouveau, mais à trois stades différents de leur végétation, à une période d'excès d'eau. L'étude proprement dite des réactions mises en jeu (carboxylation du phosphoénolpyruvate, décarboxylation du malate...,) sera ensuite abordée. Mais la recherche d'une caractérisation plus fine est indispensable si l'on veut obtenir un critère convenable de la sensibilité à l'ennoyage ; elle nécessitera la détermination des activités enzymatiques (phosphoénolpyruvate carboxylase, enzyme malique, alcool déshydrogénase...). voire l'identification d'isoenzymes.

Cependant la tolérance à l'ennoyage pourrait faire intervenir simultanément plusieurs mécanismes. Des accepteurs d'électrons, autres que l'oxygène, pourraient être utilisés par certaines espèces. C'est le cas en particulier des nitrates. On sait notamment que chez le Maïs, espèce relativement tolérante à l'excès d'eau, l'activité de la nitrate réductase se situe à la fois dans les racines et les parties aériennes, alors qu'elle est localisée dans les feuilles pour le Tabac et la Tomate (BONNER, 1950), espèces parmi les plus sensibles. On peut rappeler, par ailleurs, que l'utilisation des nitrates s'accompagne généralement d'une augmentation des teneurs en acides organiques et surtout en acide malique (BEEVERS *et al.*, 1966).

On ne doit pas aussi négliger *a priori* le rôle de la structure, de l'anatomie des systèmes racinaires dans leur adaptation au milieu. Les références sont malheureusement peu nombreuses (EMBERGER, 1960 ; METCALFE, 1960 ; METCALFE et CHALK, 1965 ; CAMEFORT et PANIEL, 1972). Certaines espèces conservent un système racinaire relativement superficiel ; tel est le cas du Tournesol. La présence d'espaces

lacuneux ou aérenchymes, à la fois dans les organes aériens et les racines de nombreuses espèces spontanées des habitats humides (METCALFE, 1960 ; METCALFE et CHALK, 1965) a été interprétée comme un mode d'adaptation à leur milieu. Des cavités intercellulaires comparables se développent chez le Blé ou le Maïs cultivés sur solution (DUNN, 1921 ; McPHERSON, 1939). Par l'intermédiaire de ces espaces, l'oxygène, pénétrant dans les parties aériennes, pourrait diffuser jusqu'aux racines (EVANS et EBERT, 1960 ; BARBER *et al.*, 1962 ; ARMSTRONG, 1964 ; GREENWOOD et GOODMAN, 1971). Il est cependant probable, sauf peut-être pour les premiers stades de la croissance, que l'oxygène fourni par un tel mécanisme ne peut couvrir la totalité des besoins de la plante (GREENWOOD, 1969).

CONCLUSION

Les espèces étudiées ont des comportements très différenciés lorsqu'elles sont soumises à un excès d'eau. Le Tabac ou la Tomate sont très peu tolérants dans nos conditions expérimentales alors que le Lin ou le Maïs supportent mieux la contrainte.

Parmi les acides organiques non cétoniques, dosés dans les extraits hydroalcoolique des racines, les acides succinique, malique, citrique et isocitrique sont ceux dont les variations, sous l'influence de l'excès d'eau, paraissent avoir une signification chez toutes les espèces.

Une certaine convergence est notée entre les comportements, tels qu'ils ont été observés, et l'évolution dans les racines des teneurs en acide malique. Sans méconnaître d'autres mécanismes qui peuvent intervenir simultanément, il semble donc que ces résultats fournissent une interprétation métabolique de la tolérance ou de a sensibilité à l'ennoyage (McMANMON et CRAWFORD, 1971). Cependant une caractérisation plus fine du niveau de sensibilité est indispensable si l'on veut obtenir un critère convenable ; elle nécessite l'étude des activités enzymatiques de l'enzyme malique et de l'alcool déshydrogénase.

Reçu pour publication en novembre 1975.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M. JOLIVET, Directeur de Recherches à la Station de Physiologie végétale de Versailles, (I. N. R. A.), qui a bien voulu nous aider de ses conseils. Ses critiques, au cours de la rédaction du présent mémoire, nous ont été également précieuses.

SUMMARY

VARIATIONS OF THE ORGANIC ACIDS CONTENTS OF PLANT ROOTS UNDER WATER EXCESS

Twelve cultivated species were submitted to a water excess period.

Roots sampling was effected according to time. The analysis of the root extracts revealed the following facts :

— a decrease of the total acidity, of the mineral acidity and an increase of the succinate content,

— in most sensitive species a decrease of the malate content which on the contrary remains constant or slightly increases in the most tolerant species,

— rather variable modifications of the citrate content.

The evolution of the contents in malic acid seems therefore to differentiate the most sensitive species from the relatively tolerant ones. It probably reveals the presence or activity of the malic enzyme, the activity level of the alcohol dehydrogenase. Both enzymes would be thus the factors of a metabolic adaptation to water excess.

ZUSAMMENFASSUNG

VARIATIONEN DER GEHALTE AN ORGANISCHEN SAÜREN VON EINEM WASSERÜBERSCHUSS UNTERWORFENEN PFLANZENWURZELN

Zwölf kultivierte Arten wurden einem Wasserüberschuss unterworfen.

Wurzelnentnahmen wurden der Zeit gemäss durchgeführt. Die Analyse der Wurzelnauszüge erweist die folgenden Tasachen :

— die Verminderung des Gesamtsaüregehalts, des Mineralsaüregehalts und die Steigerung des Succinatgehalts,

— eine Verminderung des Malatgehalts in die empfindlichsten Arten, der im Gegenteil in die tolerantsten Arten konstant bleibt oder leicht steight,

— ziemlich wechselnde Änderungen des Citratgehalts.

Die Änderung der Äpfelsaüregehalte scheint die empfindlichsten Arten von den ziemlich toleranten Arten zu unterscheiden. Sie aüssert das Vorhandensein odeur die Aktivität des Äpfelsäureenzyms und den Aktivitätstand der Alkoholdehydrogenase. Diese beiden Enzyme wären daher die Faktoren einer umsatzbezüglichen Anpassung zum Wasserüberschuss.

РЕЗЮМЕ

Изменения содержания органических кислот в корнях растений поставленных в условия избытка влаги.

К. ДЮТИОН.

Двенадцать видов растений были поставлены в условия временного затопления. Пробы корней были затем взяты, в зависимости от времени затопления. Анализы водно-спиртовых вытяжек из этих корней показали :

— уменьшение общей и минеральной кислотностей и увеличение содержания производных янтарной кислоты;

— у наиболее чувствительных видов, — уменьшение содержания малатов, остающегося, напротив, постоянным, или немного увеличенным у наиболее устойчивых видов;

— очень разные содержания производных лимонной кислоты.

Эволюция содержания яблочной кислоты отличает значит, как-будто, наиболее чувствительные виды, от видов наиболее устойчивых. Она об'ясняется, без сомнения, присутствием, или активностью яблочного энзима и уровнем активности спирта дегидрогеназы. Эти два фермента являются возможно факторами метаболической приспособленности растений к затоплению.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARMSTRONG W., 1964. Oxygen diffusion from the roots of some british bog plants. *Nature*, **204**, 801-802.

BARBER D. A., EBERT M., EVANS N. T. S., 1962. The movement of O^{15} through barley and rice plants. *J. exp. Bot.*, **13**, 397.

BARBER S. A., 1962. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.*, **93**, 39-49.

BEEVERS H., STILLER M. L., BUTT V. S., 1966. In STEWARD F. C., *Plant physiology*, IVB, 119-262, Academic Press, New York.

BLANCHET R., 1965. Quelques aspects récents des études relatives à l'alimentation minérale des plantes dans le sol. *Sci. Sol*, 109-119.

BOLTON E. F., ERICKSON A. E., 1970. Ethanol concentration in tomato plants during soil flooding. *Agron. J.*, **62**, 220-224.

BONNER J., 1950. *Plant biochemistry*, 537 p., Academic Press, New York.

BOVÉ J., RAVEUX R., 1957. La séparation et la détermination des acides carboxyliques de C_1 à C_6 par chromatographie de partage sur gel de silice. II. Nouvelle technique proposée. *Bull. Soc. chim. Fr.*, 376-381.

CAMEFORT H., PANIEL J., 1972. *Morphologie et anatomie des végétaux vasculaires*, 871 p., Doin, Paris.

CRAWFORD R. M. M., TYLER P. D., 1969. Organic acid metabolism in relation to flooding tolerance in roots. *J. Ecol.*, **57**, 235-244.

DANNER J., TING I. P., 1967. CO_2 metabolism in corn roots. II. Intracellular distribution of enzymes. *Plant Physiol.*, **42**, 719-724.

DITTRICH P., CAMPBELL W. H., BLACH C. C., 1973. Phosphoenolpyruvate carboxykinase in plants exhibiting crassulacean acid metabolism. *Plant Physiol.*, **52**, 357-361.

DUNN Q. A., 1921. Note on the histology of the grain roots. *Am. J. Bot.*, **8**, 207-211.

EFFER W. R., RANSON S. L., 1967 *a*. Respiratory metabolism in buckwheat seedlings. *Plant Physiol.*, **42**, 1042-1052.

EFFER W. R., RANSON S. L., 1967 *b*. Some effects of the oxygen concentration on levels of respiratory intermediates in buckwheat seedlings. *Plant Physiol.*, **42**, 1053-1058.

EMBERGER L., 1960. *Les végétaux vasculaires*, tome II ; Masson, Paris.

EVANS N. T. S., EBERT M., 1960. Radioactive oxygen in the study of gas transport down the root of *Vicia faba*. *J. Exp. Bot.*, II, 246..

FULTON J. M., ERICKSON A. E., 1964. Relation between soil aeration and ethyl alcohol accumulation in xylem exudate of tomatoes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 610-614.

FLANZY C., BURET M., CHAMBROY Y., 1971. Fixation à l'obscurité d'acide malique 3-^{14}C par des baies de raisin placées en anaérobiose. *Ann. Technol. agric.*, **20**, 49-60.

FULTON J. M., ERICKSON A. E., TOLBERT N. E., 1964. Distribution of C^{14} among metabolites of flooded and aerobically grown tomato plants. *Agron. J.*, **56**, 527-529.

GARCIA P., BURET M., CHAMBROY Y., FLANZY Cl., 1974. Évolution de l'activité de la I-malate NADP oxydoréductase (EC I.I.I.40) au cours du métabolisme anaérobie des baies de raisin. *C. R. Acad. Agric., Fr.*, 1193-1198.

GREENWOOD D. J., 1960. In WHITTINGTON W. J., *Root growth*, 202-223. Butterworths, Londres.

GREENWOOD D. J., GOODMAN D., 1971. Studies on the supply of oxygen to the roots of mustard seedlings (*Sinapis alba* L.). *New Phytol.*, **70**, 85-96.

HELLER R., 1974. *L'absorption minérale chez les végétaux*, 151 p., Masson, Paris.

HIATT A. J., LOVE R. V., 1967. Loss of organic acids, amino acids, K and Cl from barley roots treated anaerobically and with metabolic inhibitors. *Plant Physiol.*, **42**, 1731-1736.

JOLIVET E., 1968. Métabolisme des acides organiques et des acides aminés libres dans le tubercule de pomme de terre au cours de la rupture provoquée de son repos végétatif par la Rindite. I. Modifications induites durant les premiers jours qui suivent le traitement. *Physiol. Veg.*, **6**, 221-223.

JOLIVET E., 1969. *Métabolisme des acides organiques et des acides aminés libres chez le tubercule de pomme de terre* (Solanum tuberosum *L.*) *au cours de la cessation spontanée de son repos végétatif et au cours de la rupture provoquée de son repos par la Rindite.* Thèse Doct. (État) Sci. Nat., Orsay (France), 146 p.

KRAMER P. J., 1951. Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil. *Plant Physiol.*, **26**, 722-736.

LEYSHON A. J., SHEARD R. W., 1974. Influence of short-term flooding on the growth and plant-nutrient composition of barley. *Can. J. Soil Sci.*, **54**, 463-473.

MCMANMON M., CRAWFORD R. M. M., 1971. A metabolic theory of flooding tolerance : the significance of enzyme distribution and behaviour. *New Phytol.*, **70**, 299-306.

McPherson D. C., 1939. Cortical air spaces in the roots of *Zea mays* L. *New Phytol.*, **38**, 190-202.

Marshall D. R., Brove P., Pryor A. J., 1973. Adaptative significance of alcohol dehydrogenase isozymes in maize. *Nature New Biol.*, **244**, 16-17.

Mazelis M., Vennesland B., 1957. Carbon dioxide fixation into oxaloacetate in higher plants. *Plant Physiol.*, **32**, 591-600.

Metcalfe C. R., 1960. *Anatomy of the monocotyledons I Gramineae*, 731 p., Clarendon Press, Londres.

Metcalfe C. R., Chalk L., 1965. *Anatomy of the dicotyledons*, 1500 p., Clarendon Press, Londres.

Morot-Gaudry J. F., Nicol M. Z., Jolivet E., 1972. Identification par chromatographie sur couches minces des acides organiques préalablement séparés quantitativement sur colonne de gel de silice. *J. Chromat.*, **74**, 346-351.

Périgaud Simone, 1967. Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur la croissance et la nutrition globale de la plante. *Ann. agron.*, **18**, 485-506.

Raveux R., Bové J., 1957. La séparation et la détermination des acides carboxyliques de C_1 à C_6 par chromatographie de partage sur colonne de silice. I. Étude générale. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 369-376.

Streeter J. G., Thompson J. F., 1972. Anaerobic accumulation of gamma aminobutyric acid and alanine in radish leaves (*Raphanus sativus* L.). *Plant Physiol.*, **47**, 572-578.

Ting I. P., Dugger W. M., 1965. Transhydrogenation in plant tissue mediation by carbon dioxide. *Science*, **150**, 1727-1728.

Ting I. P., Dugger W. M., 1967. CO_2 metabolism in corn roots. I. Kinetics of carboxylation and decarboxylation. *Plant Physiol.*, **42**, 712-718.

Ting I. P., 1968. CO_2 metabolism in corn roots. III. Inhibition of phosphoenolpyruvate carboxylase by l-malate. *Plant Physiol.*, **43**, 1919-1924.

Yemm E. W., 1965. In Steward F. C. *Plant physiology*, IV/A, 231-310. Academic Press, New York.

Ann. agron., 1976, **27** (2), 221-246.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

LES RÉACTIONS DES PLANTES AUX EXCÈS D'EAU ET LEURS CONSÉQUENCES

C. DUTHION et M. MINGEAU*

Station de Science du Sol,
Centre de Recherches de Dijon, I. N. R. A.,
7, rue Sully,
21034 Dijon Cedex

* *Station d'Agronomie,*
Centre de Recherches de Clermont Ferrand, I. N. R. A.,
12, avenue de l'Agriculture,
63100 Clermont Ferrand

RÉSUMÉ

L'Agriculture est souvent gênée par la présence temporaire d'un excès d'eau dans le sol ; celle-ci résulte de conditions défavorables liées au climat, à la topographie ou à la constitution du sol lui-même.

L'excès d'eau altère profondément le milieu racinaire ; la disparition rapide de l'oxygène, les modifications des propriétés physicochimiques et biologiques du sol, qui lui sont consécutives, la transformation physique du milieu perturbent l'activité des plantes.

Des symptômes morphologiques, d'ailleurs souvent peu caractéristiques, en sont la manifestation apparente. L'alimentation hydrique et minérale est toujours affectée, les différents métabolismes racinaires sont perturbés.

On observe de grandes différences de comportement entre les espèces. Certaines sont, en effet, capables de résister à la contrainte « excès d'eau » grâce à une adaptation métabolique (métabolisme des acides organiques) ; on décrit également une possibilité d'adaptation morphologique, par développement d'espaces lacunaires dans les racines.

Les conséquences agricoles de l'ennoyage sont parfois très importantes. Elles varient cependant selon la durée de celui-ci, le moment auquel il survient dans la vie de la plante, les conditions atmosphériques ambiantes.

INTRODUCTION

La présence, même temporaire, d'un excès d'eau dans le sol est une gêne pour l'Agriculture. Elle résulte de conditions défavorables liées au climat, à la topographie ou au sol lui-même.

Fréquent, pour des raisons évidentes, dans les sols des plaines alluviales et des vallées ou dans les dépressions, l'excès d'eau n'est pas rare en situation de plaine ou de plateau. L'existence

d'une couche imperméable, due au substrat géologique proche de la surface ou à une stratification du sol à la suite d'un lessivage ou d'un tassement, peut en être la cause. Un cas très répandu est celui des sols chez lesquels l'horizon supérieur limoneux, battant, lui-même imperméable, repose sur un horizon enrichi en argile ; ce sont, parmi d'autres, les sols de boulbènes du Sud-Ouest, les « aubues » ou « erbues » de l'Auxois et de la Plaine Dijonnaise, les sols de Bresse, des Dombes. Ces quelques exemples permettent d'apprécier l'importance des surfaces agricoles soumises à cette contrainte d'hydromorphie.

Selon la durée de l'excès d'eau, le moment auquel il survient, les dégâts provoqués aux cultures peuvent être grands. Des diminutions de rendement en grains de l'ordre de 50 p. 100 chez les céréales, de 25 à 30 p. 100 chez le maïs ne semblent pas exceptionnelles. L'ennoyage entraîne un ralentissement de la croissance et par conséquent des pertes de récolte souvent élevées chez des espèces cultivées pour leurs organes végétatifs (espèces fourragères, tabac, légumes à feuilles ou légumes racines).

L'assainissement ou le drainage du sol permettent sans doute, dans de nombreuses situations, de minimiser, voire d'éliminer, les effets défavorables de l'excès d'eau ; mais de tels travaux ne sont pas toujours possibles ni peut-être économiquement souhaitables. Aussi apparaît-il nécessaire d'analyser les conséquences de l'excès d'eau sur les comportements des plantes, et d'étudier également les mécanismes en cause dans ces comportements, en vue d'adapter la culture et le système de culture, pour tirer le meilleur parti des conditions de milieu.

I. — MODES D'ACTION DE LA CONTRAINTE EXCÈS D'EAU

La présence d'eau en excès modifie profondément le milieu racinaire. La limitation des échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère conduit à une disparition rapide de l'oxygène (le milieu est dit « asphyxiant ») ; les conséquences sur le comportement des plantes peuvent être souvent aggravées par une accumulation du gaz carbonique provenant de la décomposition de la matière organique.

Cependant, d'autres facteurs interviennent. L'ennoyage d'un sol entraîne en effet des modifications de l'ensemble de ses propriétés et des réactions physicochimiques et biologiques dont il est le siège. Ponnamperuma (1972) les a détaillées dans une revue très complète.

La transformation physique du milieu, caractérisée par la disparition de toute phase gazeuse, pourrait être par elle-même un élément défavorable à la survie des végétaux.

1. — *Aération du sol*

Dans le sol, l'agencement particulier des éléments de la phase solide (structure) et la texture conditionnent le volume et la composition de la phase gazeuse de même que « l'aération du sol », c'est-à-dire les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère extérieure d'une part, entre le sol et les plantes d'autre part.

Les données concernant les caractéristiques de volume et de composition ne constituent que l'aspect statique de la situation d'un sol à un moment donné. Le problème essentiel est de savoir comment se réalise un état d'équilibre et donc de déterminer les mécanismes responsables des échanges gazeux.

Le processus d'oxygénation peut se décomposer schématiquement en trois étapes : une diffusion en phase gazeuse, une solubilisation, une diffusion en phase liquide (Vilain, 1963).

La macrodiffusion assure la distribution de l'oxygène dans les pores du sol ; le renouvellement et l'homogénéisation de la phase gazeuse libre s'effectue plus ou moins rapidement suivant

la facilité de réalisation des phénomènes d'échanges entre l'atmosphère du sol et l'atmosphère extérieure.

L'oxygène gazeux libre peut alors soit être absorbé sur les particules, soit être dissous dans l'eau du sol.

L'oxygène dissous dans le film d'eau va ensuite diffuser (microdiffusion) vers la surface de la racine par suite du gradient de concentration provoqué par la consommation en oxygène de la racine.

Le phénomène est comparable pour le gaz carbonique mais se produit en sens inverse et avec des gradients différents dus à la grande solubilité du gaz carbonique dans l'eau.

L'alimentation de la racine résulte de ces différents mécanismes de diffusion et elle ne sera assurée d'une manière correcte que si la vitesse du mécanisme le plus lent est suffisant pour fournir un flux d'oxygène satisfaisant.

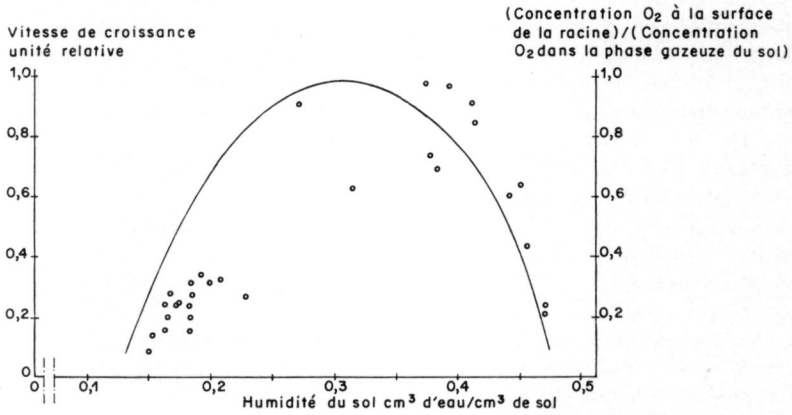


FIG. 1. — *Relation entre la vitesse de croissance, l'humidité du sol, la teneur en oxygène à la surface de la racine*
(LEMON et KRISTENSEN, 1960, d'après les résultats de MILLER et MAZURAK, 1958)

La figure 1 montre la relation entre l'humidité du sol et la teneur en oxygène à la surface de la racine. L'oxygénation peut donc connaître une baisse sensible par suite de la présence d'une trop faible quantité d'eau (épaisseur du film d'eau très faible et réduction de la mobilité de l'oxygène pour des humidités proches du point de flétrissement) ou d'une trop grande quantité d'eau (ralentissement de la macrodiffusion et diminution de la quantité dissoute dans les sols ennoyés).

2. — *Réactions physico-chimiques et biologiques dans le sol*

De nombreux systèmes oxydoréducteurs sont influencés, que ce soit par voie purement chimique ou par voie biologique.

Au fur et à mesure de la disparition de l'oxygène, des micro-organismes anaérobies facultatifs, puis des espèces anaérobies strictes se multiplient. Ces micro-organismes sont capables d'utiliser comme accepteurs d'électrons, dans leur métabolisme respiratoire, des ions minéraux tels que nitrates, sulfates, ions ferriques et manganiques (TAKAI et KAMURA, 1966), mais aussi CO_2 ou N_2.

Les réactions de réduction se produisent par étapes successives, dans un ordre déterminé par les caractéristiques thermodynamiques des différents systèmes oxydoréducteurs (ordre dont nous ne tenons pas compte dans le bref aperçu qui suit). Les produits de ces transformations deviennent toxiques à partir d'un seuil de concentration, qui souvent n'est atteint qu'après un ennoyage prolongé.

La dégradation anaérobie de la matière organique conduit à la formation transitoire d'acides roganiques ; mais une accumulation de ces derniers est possible sous certaines conditions, clima-

tiques surtout, et peut être la cause des dégâts observés sur les cultures (TAKIJIMA *et al.*, 1961 ; TAKIJIMA, 1964). Les produits terminaux des fermentations, méthane ou éthylène, présentent un caractère de grande toxicité à l'égard des plantes (SMITH et RUSSELL, 1969).

La réduction des composés du manganèse puis du fer provoque une augmentation de la fraction soluble de ces deux éléments dans le sol. On note souvent, par voie de conséquence, un accroissement de la teneur en manganèse des végétaux ; l'effet dommageable de cette accumulation suffirait à expliquer la sensibilité à l'ennoyage de plusieurs espèces (GRASMANIS, 1958 *a*, *b* ; GRAVEN *et al.*, 1965).

Les sulfures, provenant de la réduction des sulfates, sont généralement insolubilisés sous forme de sulfure de fer ; mais il est des cas où leur concentration dans la phase liquide reste suffisante pour être toxique, et FORD (1965), en particulier, a montré leur rôle dans la mortalité de racines d'agrumes.

La dynamique de tous les éléments nutritifs est aussi très perturbée. Cela est vrai notamment de l'azote. La réduction des nitrates entraîne des pertes sous forme d'azote moléculaire. La minéralisation de l'azote organique ne peut aller au-delà de la formation de l'azote ammoniacal, dont la quantité croît rapidement dans le sol ennoyé ; selon PONNAMPERUMA (1972), la quasi-totalité de l'azote minéralisable peut être transformée en azote ammoniacal au bout de deux semaines de submersion, si la température est favorable.

Les phosphates subissent également des transformations ; il en résulte généralement une augmentation de la fraction phosphorée soluble, qui est importante dans les sols sableux calcaires, mais beaucoup plus faible en sols argileux. On a décrit aussi des phénomènes d'insolubilisation accrus dans les sols ferrallitiques.

La disponibilité de l'ensemble des micro-éléments est également modifiée (NG SIEW KEE et BLOOMFIELD, 1962).

Un ennoyage prolongé peut aussi aboutir à la destruction de la structure, par dissolution et entraînement des ciments (BÉTREMIEUX, 1951 ; KITA et KAWAGUCHI, 1960), provoquant un tassement préjudiciable aux plantes.

3. — *Milieu physique*

Selon PÉRIGAUD (1967), les dommages subis par les cultures ne sont pas entièrement imputables à l'insuffisance de l'aération du sol ou à la présence de substances toxiques.

Le milieu physique est devenu par lui-même défavorable à l'activité ou à la survie d'un système racinaire qui s'est développé initialement sur un support comportant une phase gazeuse.

Sans être aussi explicites, d'autres faits impliquent cependant cette action propre au milieu aqueux. Ainsi, notamment, VARADE *et al.* (1971) ont noté, en ce qui concerne le Riz, que la teneur en eau du sol a un effet plus significatif sur le développement de la porosité racinaire (cf. III, 1) que l'oxygénation du milieu.

II. — COMPORTEMENT BIOLOGIQUE DES PLANTES A L'ENNOYAGE

Les informations, portant sur les modifications et les troubles qui surviennent dans la morphologie, l'activité métabolique et la nutrition des plantes au cours de l'ennoyage, sont assez nombreuses.

1. — *Modifications morphologiques*

A partir des descriptions faites par plusieurs auteurs et en tenant compte de nos observations, il est possible de dégager quelques symptômes assez généraux liés à la contrainte excès d'eau.

Ils sont d'ailleurs souvent peu caractéristiques ; ils apparaissent avec des rapidités et des intentsiés variables selon les espèces.

La croissance de tous les organes de la plante est ralentie. Ce ralentissement est d'autant plus marqué que les conditions d'environnement (température, luminosité) sont plus favorables.

L'un des premiers symptômes visible est le flétrissement des parties aériennes. Commençant par celles qui sont à la base de la tige, les feuilles jaunissent puis meurent ; on note chez certaines espèces, comme la Tomate, un changement de l'angle d'insertion des pétioles sur la tige. Quelquefois apparaît au niveau du plan d'eau un bourrelet de tissu calleux.

Les racines deviennent brunes, molles, très visqueuses ; leur élongation est stoppée par arrêt de la division cellulaire (WILLIAMSON, 1968). Les méristèmes apicaux meurent. VARTAPETIAN *et al.* (1970) ont montré que l'anaérobiose provoque des modifications importantes de la structure fine des cellules racinaires : lésions des mitochondries rapidement irréversibles, diminution du nombre des ribosomes, éclaircissement du protoplasme, fragmentation de l'enveloppe du noyau dans lequel apparaissent quelques granules compacts.

Après quelques jours d'ennoyage, des racines nouvelles sont émises à la base de la tige ; elles sont blanches, courtes, épaisses. Leur morphologie résulte des dimensions des cellules corticales, plus courtes, plus épaisses que celles de racines normalement développées dans un milieu bien aéré (PITMAN, 1969).

Les réactions des espèces ligneuses pérennes sont comparables. Gravement atteints, les arbres fruitiers présentent au niveau du collet un noircissement caractéristique (pourriture du collet).

2. — *Modifications physiologiques*

2. 1. *Respiration.*

De nombreuses réactions biosynthétiques, indispensables à la plante pour sa nutrition et sa croissance, dépendent directement du métabolisme respiratoire.

L'importance de l'oxygène, dans ce métabolisme, tient à son rôle d'accepteur terminal d'électrons. En son absence, les phosphorylations oxydatives, qui sont couplées avec les systèmes transporteurs d'électrons, ne se font plus. La formation de composés riches en énergie est donc limitée aux phosphorylations qui ont lieu au cours de la glycolyse (voie d'EMBDEM-MEYERHOF-PARNAS), dont le produit final est l'acide pyruvique. En condition anaérobie, ce dernier est réduit en acide lactique et/ou surtout en éthanol (DEYSSON, 1966 ; YEMM, 1965). Le cycle de l'acide citrique est donc bloqué et, par conséquent, la production de métabolites importants, précurseurs de nombreuses synthèses.

On constate ainsi qu'un excès d'eau dans le sol entraîne, en tout premier lieu, une diminution de l'activité respiratoire des racines. Par exemple, FULTON *et al.* (1964) ont montré que la Tomate réagit rapidement : la respiration et divers types de métabolismes sont perturbés dans des délais très courts (quelques heures à quelques dizaines d'heures après le début de l'ennoyage). On note en particulier une forte accumulation d'éthanol dans la sève de la plante (FULTON et ERICKSON, 1964 ; BOLTON et ERICKSON, 1970).

Des différences existent cependant entre espèces. Elles sont à l'origine d'un schéma théorique de la résistance à l'ennoyage (MCMANMON et CRAWFORD, 1971 ; cf. III, 2).

2. 2. *Absorption d'eau.*

L'absorption d'eau et la transpiration diminuent beaucoup lorsque les plantes se trouvent placées, même pendant une période brève, dans des milieux insuffisamment aérés. Le flétrissement des parties aériennes est l'une des premières manifestations des effets de l'excès d'eau.

Sous des conditions climatiques favorables à la croissance, un ennoyage de 48 heures réduit l'absorption d'eau par un maïs, au stade 8e feuille, à 45 p. 100 de ce qu'elle est en milieu normalement ressuyé ; cette diminution relative est cependant moins importante lorsque les conditions extérieures sont défavorables (PÉRIGAUD, 1967, fig. 2).

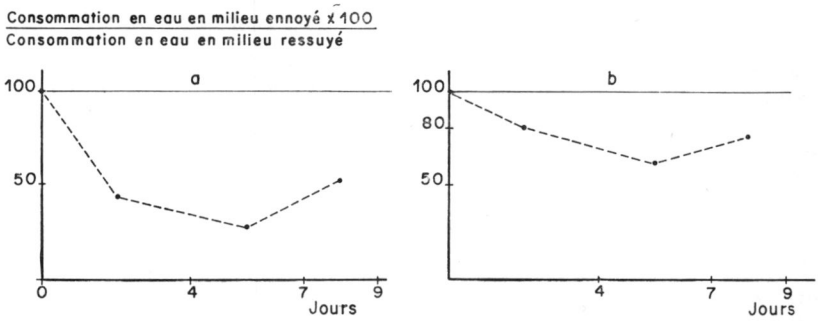


FIG. 2. — *Effets de l'ennoyage sur la consommation en eau du maïs* (d'après PÉRIGAUD, 1967)

——— Milieu normal (ressuyé)
— — — Milieu ennoyé

a) conditions extérieures favorables
b) conditions extérieures défavorables

L'anaérobiose amoindrit rapidement l'aptitude des racines à absorber l'eau et à la transférer. Dans des expériences de courte durée, WILLEY (1970) en fournit une bonne démonstration chez le Tabac (fig. 3) : la réduction de l'absorption d'eau, qui suit immédiatement le début de la période anaérobie, est accompagnée d'une diminution du diamètre de la tige et, par la suite, d'un léger flétrissement de la plante ; quelques minutes après la fin du traitement, l'inhibition de l'absorption d'eau par les racines cesse puis le diamètre de la tige augmente.

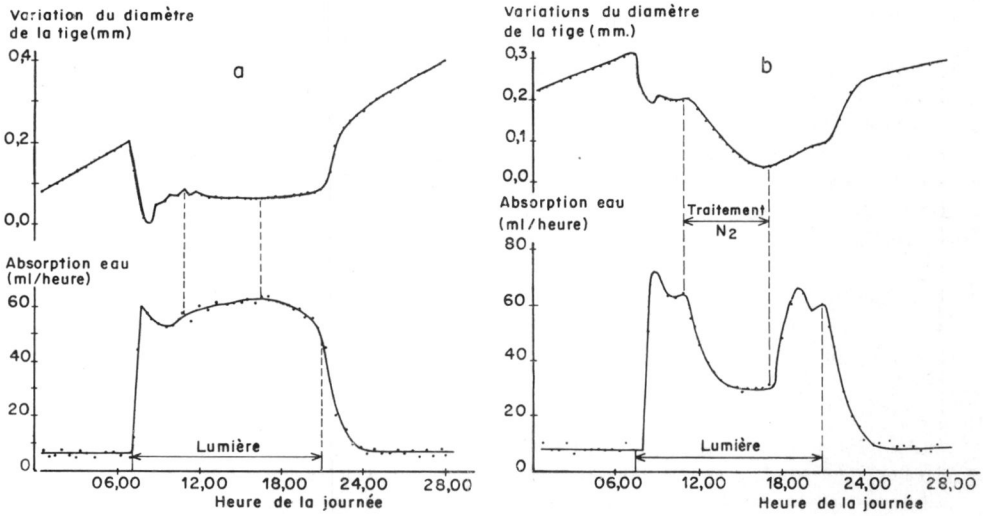


FIG. 3. — *Absorption d'eau et variations du diamètre de la tige d'un plant de tabac au cours de la journée* (d'après WILLEY, 1970)

a) conditions normales
b) effets de conditions anaérobies au niveau des racines pendant une période de 6 heures.

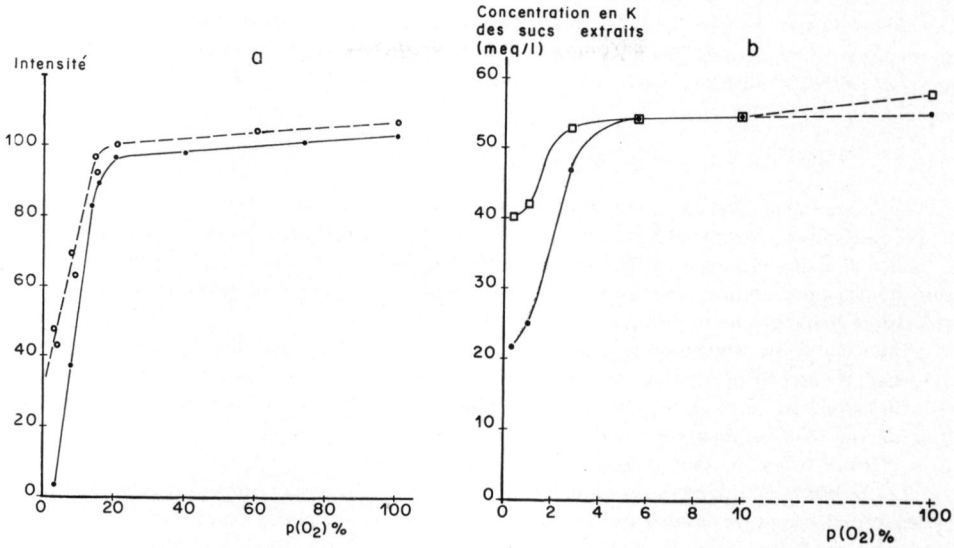


FIG. 4. — *Influence de la pression d'oxygène sur l'absorption minérale*

a) tranches de tubercule de pomme de terre, comparaison avec la respiration (d'après STEWARD *et al.* 1936).

○———○ Respiration
●———● Absorption du brome

b) racines excisées de riz et de tomate (d'après VLAMIS et DAVIS, 1944).

□———□ Riz
●———● Tomate

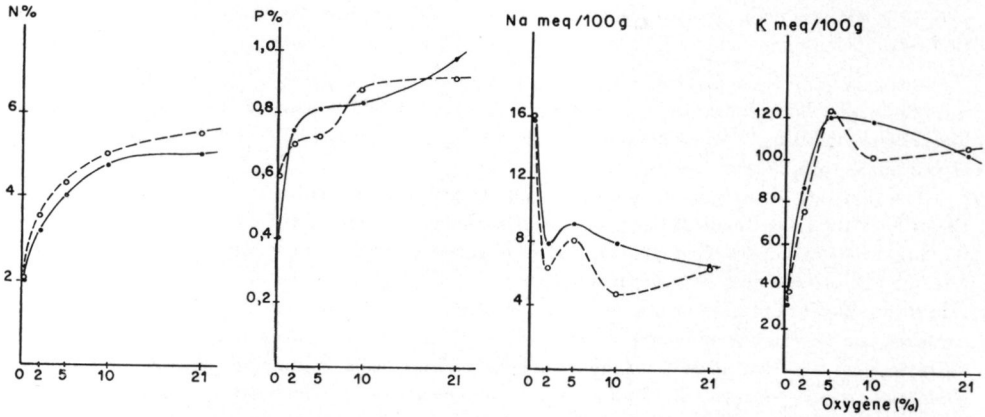


FIG. 5. — *Concentration en différents éléments nutritifs dans les parties aériennes d'un Paturin des Prés, à la première* (●) *et à la seconde coupe* (○), *en fonction de la teneur en oxygène de la phase gazeuse du sol* (d'après LETEY *et al.*, 1964).

L'absorption d'eau est considérée, de façon générale, comme un processus essentiellement passif, lié à la transpiration de la plante. Aussi KRAMER (1949) suggère-t-il que le ralentissement des transferts hydriques en milieu anaérobie est due à la diminution de la perméabilité racinaire. Cependant, la part relative de l'absorption dite active dans l'absorption totale d'eau n'est sans doute pas aussi négligeable qu'on l'a affirmé jusqu'ici (MORIZET et ROBELIN, 1972) ; liée au transport des éléments minéraux, elle décroît également du fait de la diminution de l'absorption des ions.

2. 3. *Absorption des éléments minéraux.*

On admet généralement que l'absorption des éléments minéraux s'effectue en deux temps. La première phase correspond à des processus purement physico-chimiques (diffusion et adsorption en milieu aqueux), mais la seconde (pénétration et accumulation des ions) demande l'intervention de systèmes métaboliques et nécessite donc de l'énergie. Cette énergie est procurée à la plante par son propre métabolisme respiratoire.

Dans une revue bibliographique, BEEVERS (1961) a rappelé les relations directes ou indirectes qui existent entre la respiration et de nombreux processus physiologiques, dont l'absorption des sels. Ce lien étroit entre absorption minérale et respiration (fig. 4) a été mis en évidence par les travaux sur tissus végétaux et racines excisées (HOAGLAND et BROYER, 1936 ; STEWARD *et al.*, 1936 ; BERRY, 1949 ; VLAMIS et DAVIS, 1944, 1959).

Les résultats de ces travaux, confirmés et étendus, en particulier par des études sur plantes entières, permettent de dégager des tendances assez générales quant à l'influence des conditions d'aération sur l'absorption des ions minéraux et leur accumulation dans la plante :

— l'absorption des éléments nutritifs reste relativement constante tant que la concentration en oxygène ne descend pas au-dessous de 10 p. 100 (fig. 5) ; elle diminue ensuite selon une courbe de type logarithmique (DANIELSON et RUSSELL, 1957 ; HARRIS et VAN BAVEL, 1957);

— l'absorption des différents éléments est inégalement perturbée par un défaut d'oxygénation ; on constate l'ordre de sensibilité suivant : K > N > P > Ca > Mg (CHANG et LOOMIS, 1945 ; HOPKINS *et al.*, 1950 ; LETEY *et al.*, 1961, 1962, 1964). La position relative du phosphore peut cependant être modifiée par la teneur en CO_2 du milieu, car la solubilité de ses composés croît lorsque la concentration en CO_2 augmente (LAWTON, 1946) ;

— le sodium, contrairement aux autres éléments, s'accumule dans la plante, lorsque l'aération est déficiente (SOWELL et ROUSE, 1958 ; LEGGETT et STOLZY, 1961).

Les Agronomes connaissent l'influence bénéfique de la fertilisation sur la croissance des végétaux dans les sols où l'aération est difficile ; un haut niveau de fertilité peut en compenser, dans une certaine mesure, les effets défavorables (CHANG et LOOMIS, 1945 ; CLINE et ERICKSON, 1959 ; HUMPHRIES, 1962 ; STENGEL *et al.*, 1972).

L'action des nitrates a été plus particulièrement étudiée (HAMMER, 1936 ; SHIVE, 1941). Pour une nutrition optimale de l'orge en culture sur solution, ARNON (1937) signale des interactions impliquant l'aération, les oligo-éléments, le pH et la source d'azote. En solution alimentée en azote nitrique, les plantes ne sont pas affectées par l'absence d'aération car l'ion nitrique permet une respiration plus importante et une meilleure absorption. Ce rôle des nitrates n'est cependant pas confirmé par tous les auteurs ; ainsi SHALHEVET et ZWERMAN (1959) obtiennent, pour des cultures de maïs ennoyées, des rendements quasi identiques avec les sels ammoniacaux et les nitrates. BERGMAN (1959), pour sa part, indique que l'effet de l'azote nitrique est en général bénéfique en solution pour des teneurs en oxygène faibles, mais, par contre, qu'il peut être nuisible dans les sols ennoyés.

2. 4. *Formation de produits toxiques.*

Lorsque les conditions d'approvisionnement en oxygène deviennent insuffisantes, l'acide pyruvique produit par la glycolyse est décarboxylé et l'acétaldéhyde ainsi formé est réduit en

éthanol ; celui-ci a été mis souvent en évidence dans les tissus végétaux (NANCE, 1949 ; SIEGEL, 1961 ; WAGER, 1961).

FULTON et ERICKSON (1964) ont mesuré la production d'éthanol chez des tomates ennoyées. La figure 6 montre que la quantité d'éthanol dans l'exsudat augmente très fortement quand la vitesse de diffusion de l'oxygène devient inférieure à 20×10^{-8} g · cm^{-2} · mn^{-1} (mesures effectuées à 2 cm au-dessous du niveau du sol). L'alcool apporté en solution nutritive à des concentrations identiques à celles trouvées dans les exsudats provoque une diminution significative de la croissance.

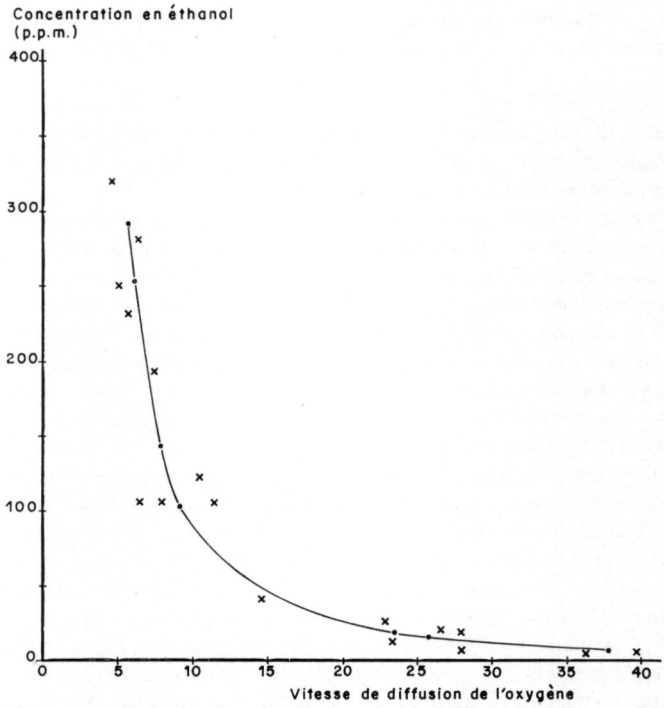


FIG. 6. — *Relation entre l'aération du sol et l'accumulation d'éthanol dans les exsudats de tomates* (d'après FULTON et ERICKSON, 1964)

La vitesse de diffusion de l'oxygène est exprimée en g · cm^{-2} · mn^{-1} $\times 10^{-8}$

● Valeurs moyennes
× Valeurs individuelles

Les résultats obtenus par FULTON et ERICKSON (1964) laissaient entrevoir la possibilité d'utiliser la teneur en éthanol de la plante comme diagnostic des conditions de mauvaise aération du sol. Malheureusement, cet aspect fort prometteur n'a pas été confirmé par les travaux ultérieurs destinés à préciser ces relations (AUBERTIN *et al.*, 1966). En effet, la méthode ne permet pas de détecter les anaérobioses prolongées et les résultats sont entachés d'une grande variabilité qui tient sans doute pour une part à la difficulté même de dosage de l'éthanol dans les tissus végétaux et à sa volatilité.

La production d'alcool est directement liée à la déviation du métabolisme respiratoire, mais la formation de substances phytotoxiques peut également intervenir par d'autres voies. C'est ainsi que l'hydrolyse de l'amygdaline, hétéroside cyanogénique présent en quantité importante dans les racines du Pêcher, libère deux corps toxiques : l'acide cyanhydrique et l'aldéhyde benzoïque (PATRICK, 1955 ; WARD et DURKEE, 1956). La mise en contact de l'hétéroside et de l'en-

zyme (émulsine) qui en permet l'hydrolyse se réalise en conditions d'anaérobiose par suite de la perte par les parois cellulaires, qui isolent les deux corps, de leur caractère semi-perméable (ROWE, 1966).

Les travaux récents de SALESSES et JUSTE (1970, 1971) confirment ces vues et apportent d'intéressantes précisions sur le problème. Leurs résultats montrent que certaines substances, présentes dans les racines, sont responsables, d'une part, de l'effet « fatigue du sol » et, d'autre part, de la sensibilité à l'asphyxie radiculaire ; ils mettent également en évidence le rôle important joué par l'acide cyanhydrique dans l'effet inhibiteur observé. Il existe une assez bonne relation entre la teneur en amygdaline et le caractère phytotoxique des écorces mais, par contre, la liaison entre la teneur en amygdaline et l'échelle de tolérance à la submersion n'apparaît pas nettement, du fait vraisemblablement de l'action d'autres facteurs sur la résistance à l'excès d'eau.

2. 5. *Métabolisme auxinique.*

Quelques-uns des symptômes observés après une période d'excès d'eau ou d'aération déficiente (hypertrophie des tiges, développement de racines adventives...) suggèrent une altération dans la production, le transport et l'activité des auxines.

Sur des coléoptiles d'avoine, DUBUY et OLSON (1940) observent l'action inhibitrice de l'absence d'oxygène sur le mouvement des auxines ; cet effet est attribué à un arrêt des courants cytoplasmiques (cyclose) et à une augmentation de la viscosité du protoplasme.

D'une façon générale, l'activité auxinique semble bien en liaison étroite avec l'aptitude de plantes à survivre en conditions d'ennoyage ; en effet, elle provoque l'augmentation de la lignification et du volume des lacunes dans les racines, deux caractères qui interviendraient dans la tolérance à l'excès d'humidité (YAMASAKI, 1952 ; VAN OVERBEEK, 1959). L'émission de racines adventives constitue une autre possibilité de résistance à la submersion ; pour KRAMER (1951), l'initiation de nouvelles racines est liée à l'accumulation d'auxines dans la tige.

Les travaux de SENEWIRATNE et MIKKELSEN (1961) apportent des précisions sur les mécanismes limitant le développement du Riz en culture sèche. Les observations effectuées au cours de la croissance montrent qu'en l'absence de submersion, le tallage est réduit, les entrenœuds des tiges sont plus courts et la surface foliaire plus faible, la floraison est retardée, le taux d'hydratation moindre. Toutes ces réactions peuvent s'interpréter sur la base d'une modification du métabolisme auxinique. Chez les plantes cultivées en conditions sèches, l'activité de la catalase est faible mais celle de la péroxidase est élevée, deux caractères qui favorisent une dégradation accélérée de l'auxine, alors que chez les plantes ennoyées, les activités respectives de ces deux enzymes sont relativement inversées. Un tel comportement, qui est en relation étroite avec la teneur en manganèse de la plante (RAY, 1958), semble le principal facteur limitant la croissance et les rendements du riz cultivé sans submersion.

III. — MÉCANISMES D'ADAPTATION OU DE RÉSISTANCE

1. — *Adaptation morphologique*

1. 1. *Morphologie des racines.*

Les espèces qui vivent dans les zones marécageuses développent souvent un système racinaire très superficiel. Certaines, cependant, sont capables de s'enraciner plus profondément ; la morphologie de leurs racines est particulière, caractérisée par la présence d'espaces lacunaires remplis de gaz, appelés aérenchymes. On observe des cavités intercellulaires semblables par exemple chez le Maïs cultivé sur solution (MCPHERSON, 1939).

1. 2. *Pouvoir rhizogène.*

L'aptitude d'une plante à survivre à un ennoyage peut dépendre de sa capacité à former de nouvelles racines (KRAMER, 1951 ; JOSHI et DASTANE, 1965) ; physiologiquement différentes des racines initiales, elles posséderaient notamment des systèmes enzymatiques respiratoires moins exigeants en oxygène. Après quelques jours d'ennoyage, la plupart des espèces émettent, en effet, des racines, souvent au niveau d'un nœud du bas de tige (ALEXANDER *et al.*, 1972). Leur nombre et le temps nécessaire à leur apparition sont cependant variables : très vite nombreuses chez le Maïs, elles restent assez clairsemées chez la Moutarde ou le Tabac, alors que le système racinaire initial de ces deux espèces est déjà nécrosé.

L'initiation de ces nouvelles racines serait liée au métabolisme auxinique.

1. 3. *Transfert interne d'oxygène. Porosité racinaire.*

La présence d'aérenchymes dans les organes des espèces spontanées des habitats humides a conduit à envisager puis à démontrer l'existence d'un transport interne d'oxygène depuis les parties aériennes de ces plantes jusqu'à leurs racines (COULT et VALLANCE, 1958 ; ARMSTRONG, 1964, 1967).

On sait que les racines du Riz sont capables de maintenir, à leur proximité immédiate, des conditions oxydantes (VAN'T WOUDT et HAGAN, 1957). D'autre part, BARTLETT (1961) a mis en évidence une relation entre la tolérance à l'ennoyage de plusieurs espèces fourragères et leur capacité d'oxyder les ions ferreux en solution dans le milieu racinaire. Ce sont là des preuves indirectes qu'il existe également un transfert interne d'oxygène chez ces espèces. L'emploi des méthodes isotopiques a permis de le prouver sans ambiguïté pour la Fève, l'Orge, le Maïs, à un stade jeune (EVANS et EBERT, 1960 ; BARBER *et al.*, 1962 ; JENSEN et KIRKHAM, 1963). D'ailleurs, JENSEN *et al.* (1967) ont pu calculer des coefficients apparents de diffusion longitudinale de l'oxygène dans les racines ; ces coefficients pour l'Orge, le Maïs et le Riz, croissent en même temps que leurs tolérances respectives à une aération insuffisante.

Par une différente technique, GREENWOOD (1967) a montré qu'une diffusion de l'oxygène s'établit rapidement depuis les feuilles jusqu'aux racines, lorsqu'on place des plantules dans une atmosphère d'O_2. La figure 7 démontre clairement la réalité d'un tel transfert (GREENWOOD et GOODMAN, 1971).

Une certaine adaptation morphologique, par développement de lacunes et augmentation du transfert gazeux interne est donc vraisemblable. La mesure de la porosité racinaire (volume d'espaces gazeux/unité de volume de racines) devrait fournir une indication de la facilité avec laquelle les mouvements d'oxygène peuvent se faire. En effet, on constate que la porosité racinaire du Riz est très supérieure à celle des autres espèces cultivées (JENSEN *et al.*, 1967, 1969).

Cependant, la signification fonctionnelle des aérenchymes n'est pas admise par tous les auteurs. En effet, les tissus des plantes adaptées aux milieux humides ne possèdent pas toujours de tels espaces lacunaires ; l'examen minutieux des racines du Riz montre également que certaines zones en sont totalement dépourvues (FREED *et al.*, 1965). Selon WILLIAMS et BARBER (1961) ou COULT (1964), leur présence n'améliore pas nécessairement la diffusion de l'oxygène des parties aériennes aux racines ; ces auteurs considèrent plutôt que les aérenchymes assurent une certaine réserve en oxygène ou permettent une économie dans la consommation d'oxygène par unité de volume de racine. D'autre part, des essais sur des espèces jugées intolérantes à l'excès d'eau indiquent un transfert d'oxygène aussi important que chez des plantes tolérantes (VAN DER HEIDE *et al.*, 1963 ; GREENWOOD, 1967). C'est pourquoi GREENWOOD (1968) conclut à l'insuffisance de ce mécanisme pour assurer une activité normale du système racinaire en sol saturé, sauf pour des végétaux au début de leur croissance. Enfin, MITSUI *et al.* (1962) ont suggéré que l'oxygène contenu dans les espaces lacunaires serait d'origine purement métabolique.

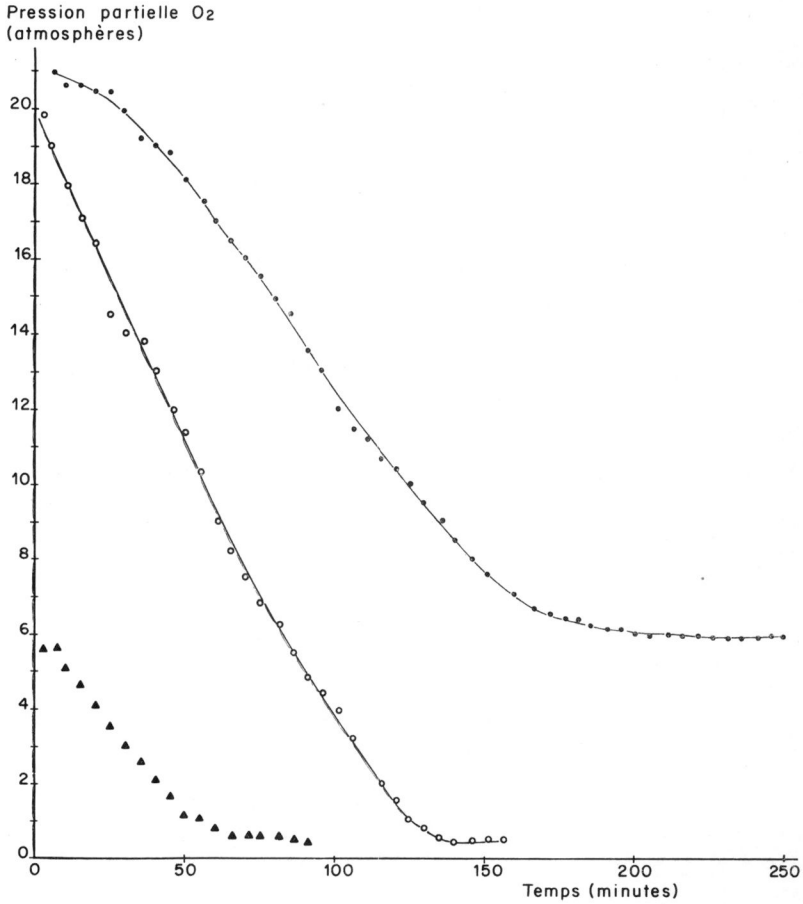


FIG. 7. — *Pression partielle d'oxygène dans le milieu entourant les racines de plantules de moutarde. Culture en solution. Racines isolées de l'atmosphère ambiante*
(d'après GREENWOOD et GOODMAN, 1971)

● les feuilles des plantules sont placées dans l'air ;
▲ puis dans l'azote ;
○ après avoir coupé la tige, fermé la plaie et aéré à nouveau la solution.

2. — *Adaptation métabolique*

L'explication de la tolérance à l'ennoyage par simple adaptation morphologique n'apparaît donc pas suffisante et il est nécessaire d'envisager d'autres mécanismes, en particulier le rôle possible d'adaptations métaboliques. Cet aspect du problème a été étudié par CRAWFORD et son équipe (CRAWFORD, 1967, 1969 ; CRAWFORD et McMANMON, 1968 ; CRAWFORD et TYLER, 1969 ; McMANMON et CRAWFORD, 1971).

La distribution et l'activité de plusieurs enzymes du métabolisme glycolytique et respiratoire, déterminées par ces auteurs pendant une période expérimentale d'ennoyage chez des espèces spontanées de différents habitats, les ont conduits à élaborer un schéma théorique des réactions qui interviennent vraisemblablement. Le classement des espèces étudiées en tolérantes ou non tolérantes à l'excès d'eau repose sur les comportements observés au cours de l'expérience (CRAWFORD, 1966).

2. 1. *Métabolisme des plantes non tolérantes à l'excès d'eau.*

Dans les racines des plantes intolérantes à l'ennoyage (fig. 8 *a*), le métabolisme respiratoire normal est interrompu et la glycolyse conduit à la formation d'acétaldéhyde puis d'éthanol. L'activité de l'alcool déshydrogénase augmente et comme, dans le même temps, la valeur apparente de la constante de Michaelis de cette enzyme diminue, il en résulte une accélération de la glycolyse par la voie d'EMBDEN-MEYERHOF. Le malate présent est décarboxylé en pyruvate sous l'action de l'enzyme malique, contribuant aussi à la formation d'éthanol. La régénération du malate, à partir de l'oxaloacétate formé par carboxylation du phosphoénolpyruvate, ne permet pas d'en maintenir le niveau dans les cellules, car la vitesse de décarboxylation l'emporte nettement. L'accumulation d'éthanol à laquelle concourent l'ensemble de ces réactions, est toxique pour la plante.

Des travaux plus récents ont confirmé le rôle de l'alcool déshydrogénase : accroissement d'activité (FRANCIS *et al.*, 1974), induction d'isoenzymes plus actifs (MARSHALL *et al.*, 1973 ; BAIEROVA et KOHL, 1974), sous l'effet de l'excès d'eau chez des espèces ou variétés sensibles.

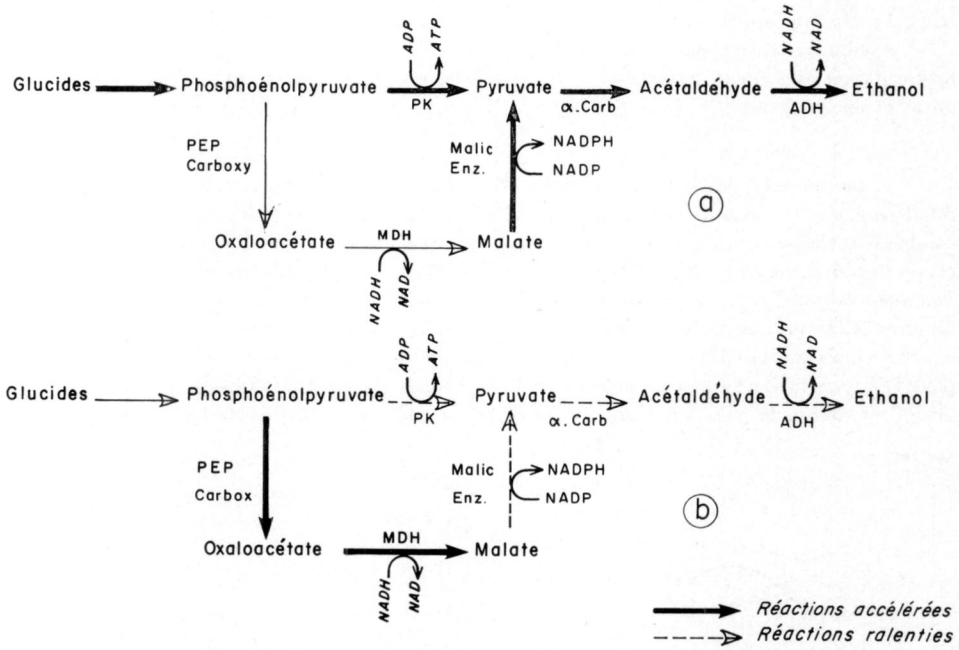


FIG. 8. — *Schéma des réactions* (adapté de MCMANMON et CRAWFORD, 1971)
a) pour les espèces intolérantes à l'ennoyage
b) pour les espèces tolérantes à l'ennoyage
PK : pyruvate kinase ; PEP Carbox : phosphoénolpyruvate carboxylase ; α-Carb : α-carboxylase ; ADH : alcool déshydrogénase ; MDH : malate déshydrogénase ; Malic Enz. : enzyme malique.

2. 2. *Métabolisme des plantes tolérantes à l'excès d'eau.*

Dans les racines des plantes tolérantes (fig. 8 *b*), la respiration n'est que partiellement bloquée ; on n'observe pas d'accélération de la glycolyse, car l'activité de l'alcool déshydrogénase n'est pas accrue, ni la valeur de sa constante de Michaelis modifiée. La très faible activité de l'enzyme malique se traduit par un ralentissement de la décarboxylation du malate qui, par conséquent, s'accumule : mis en réserve à l'intérieur de la vacuole, il peut rester dans la plante, sans dommage pour elle, jusqu'à ce que des conditions aérobies s'établissent à nouveau.

Ce mode d'adaptation n'est cependant pas le seul. Ainsi, chez une espèce rhizomateuse comme l'Iris, c'est l'acide shikimique qui s'accumule dans les racines et les rhizomes (TYLER et CRAWFORD, 1970), car intervient non seulement la séquence des réactions de la voie d'EMBDEN-MEYERHOF, mais aussi le cycle des pentoses-phosphates.

D'une façon générale, ces études montrent la possibilité de relier des différences écologiques entre les espèces à des comportements physiologiques qui résultent de l'action de systèmes enzymatiques spécifiques.

IV. — CONSÉQUENCES DE L'ENNOYAGE SUR LA CROISSANCE DES PLANTES

1. — *Aération du sol et comportement des plantes*

Les données de la figure 1 montrent de manière explicite que la présence d'une trop grande ou d'une trop faible quantité d'eau peut entraîner une nette réduction de l'oxygénation des racines et qu'il existe un rapport optimal entre l'eau et l'air dans le sol (VILAIN, 1963).

Un ennoyage correspond à des conditions extrêmes : mais dès que les caractéristiques de l'aération du sol atteignent certaines valeurs critiques, les plantes subissent un ralentissement ou un arrêt de croissance.

1. 1. *Macroporosité du sol.*

Une première approche des conséquences de l'aération du sol sur le comportement des plantes est fournie par les relations entre la capacité en air du sol (définie, par la plupart des auteurs, comme étant égale à la porosité non capillaire, mesurée à la capacité de rétention en eau du sol) et la croissance végétale. Ainsi WESSELING et VAN WIJK (1957) considèrent qu'une valeur de la macroporosité de 10 p. 100 est une limite inférieure pour beaucoup de cultures. Cependant, des différences existent entre les espèces ; KOPECKY (1927) donne les gammes optimales suivantes : 6 à 10 p. 100 pour les Graminées fourragères, 10 à 15 p. 100 pour le Blé et l'Avoine, 15 à 20 p. 100 pour l'Orge et la Betterave. La croissance de la Tomate est optimale lorsque la capacité en air du sol est voisine de 30 p. 100 alors qu'elle est faible à 10 p. 100 (FLOCKER *et al.*, 1959, fig. 9).

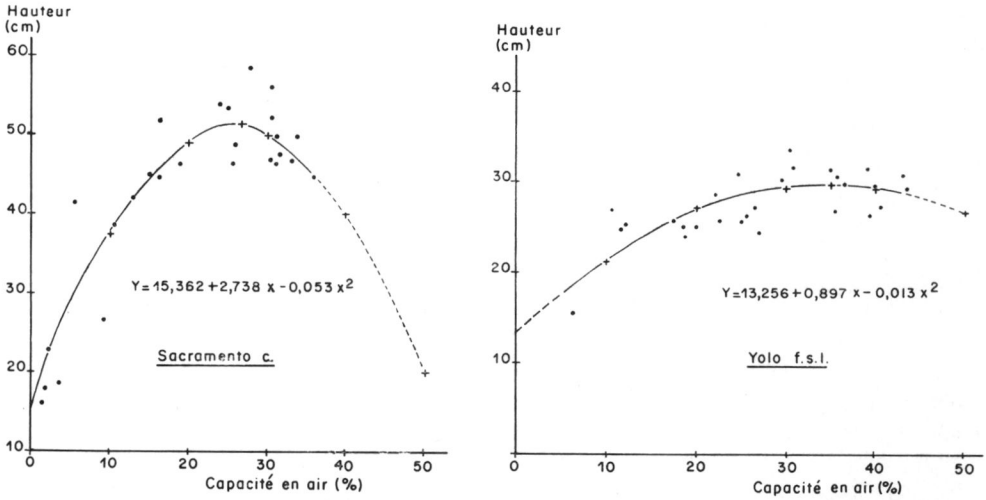


FIG. 9. — *Influence de la capacité en air du sol sur la croissance de Tomates* (hauteur de la plante à 6 semaines) *dans un sol argileux* (Sacramento Clay) *et dans un sol sablo-limoneux* (Yolo fine sandy loam) (d'après FLOCKER, VOMOCIL et HOWARD, 1959).

1. 2. *Composition de l'atmosphère du sol.*

Des expériences ont été faites depuis longtemps pour apprécier les effets de la composition de l'atmosphère du sol sur les végétaux. Par exemple, CANNON (1925) a montré, dans des essais de courte durée, qu'une bonne croissance racinaire nécessite, chez de nombreuses espèces, 8 à 10 p. 100 d'oxygène, alors qu'elle est très ralentie à 0,5 ou 2 p. 100. De même, GEISLER (1967) observe une diminution de la longueur du système racinaire de l'Orge lorsque la teneur en oxygène est inférieure à 7 p. 100, et une réduction du nombre de racines séminales lorsqu'elle est comprise entre 14 et 21 p. 100. L'élongation du pivot du Coton et du Soja, qui est normale dès que le taux d'oxygène est supérieur à 10 p. 100, cesse dans les deux ou trois minutes qui suivent l'absence d'oxygène (HUCK, 1970).

1. 3. *Vitesse de diffusion de l'oxygène.*

Cependant, CANNON (1925) notait déjà que la croissance racinaire peut se poursuivre sous une faible pression d'oxygène, à condition que celui-ci soit constamment renouvelé. Les travaux les plus récents lient en effet davantage le comportement de la plante à la vitesse de diffusion de l'oxygène dans le sol qu'à sa teneur. Ainsi, pour beaucoup de cultures, la croissance racinaire optimale serait observée, lorsque la vitesse de diffusion de l'oxygène est de l'ordre de $40 \cdot 10^{-8}$ g · cm^{-2} · mn^{-1} (LETEY *et al.*, 1962, 1964, 1965). Quand celle-ci décroît, ce qui se produit en particulier lors de la saturation progressive de la macroporosité par l'eau, l'élongation racinaire est réduite ; elle cesse lorsque la vitesse de diffusion de l'oxygène atteint $20 \cdot 10^{-8}$ g · cm^{-2} · mn^{-1} pour le Tournesol, $10 \cdot 10^{-8}$ g · cm^{-2} mn^{-1} pour le Maïs. CLINE et ERICKSON (1959), prenant comme critère la hauteur de la plante, ont montré qu'il existe pour le Pois un niveau critique compris entre 70 et $100 \cdot 10^{-8}$ g · cm^{-2} · mn^{-1} (fig. 10) [1]. Des observations faites au champ ont quelque-

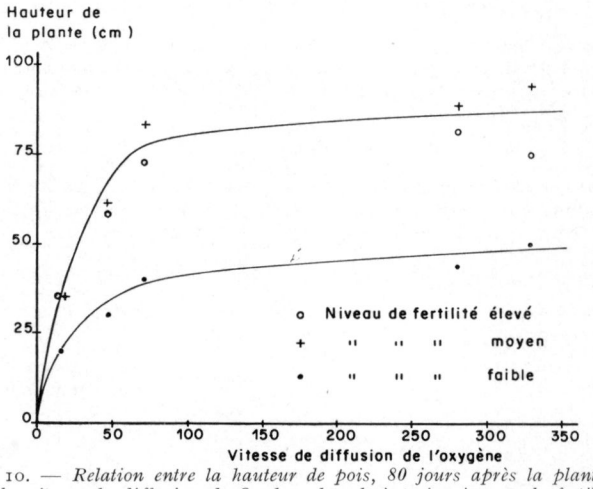


FIG. 10. — *Relation entre la hauteur de pois, 80 jours après la plantation, et la vitesse de diffusion de O_2 dans le sol, à trois niveaux de fertilité*
(d'après CLINE et ERICKSON, 1959)

La vitesse de diffusion de l'oxygène est exprimée en g · cm^{-2} · mn^{-1} × 10^{-8}

fois confirmé l'importance de telles données. ERICKSON et VAN DOREN (1960) ont montré, sur plusieurs années de cultures, l'existence d'une certaine relation entre les rendements de la Betterave à sucre et la vitesse de diffusion de O_2 dans le sol, mesurée *in situ* au début de la période culturale (tabl. 1) ; les résultats obtenus avec le Maïs sont par contre tout à fait contradictoires.

[1] Les valeurs des vitesses de diffusion limites diffèrent parfois d'un auteur à l'autre, pour une même espèce végétale, parce qu'obtenues dans des conditions analytiques un peu différentes (dimensions des électrodes de mesure, etc.).

TABLEAU I

Effet de la vitesse de diffusion de O_2 dans le sol sur le rendement de la betterave à sucre
(d'après ERICKSON et VAN DOREN, 1960)

	Année	Vitesse de diffusion O_2 $g \cdot cm^{-2} \cdot mn^{-1} \cdot 10^{-8}$	Rendements t/ha
Sole 1	1955	40,7	47,5
	1956	30,5	23,0
	1957	30,0	21,5
Sole 2	1955	40,3	49,2
	1956	32,0	20,8
	1957	30,5	17,4

N. B. : 1956 : printemps très humide.
1957 : très fortes pluies en juillet.

Un haut niveau de fertilité (fig. 10), la présence de nitrates pourraient pallier, dans une certaine mesure, la déficience en oxygène (cf. II-2-3).

2. — *Age physiologique et comportement des plantes*

Les conséquences d'une réduction de l'aération au niveau des racines dépendent souvent de la période à laquelle celle-ci se produit ; ainsi, pour le Pois, c'est lorsque la déficience survient au moment de la floraison ou au cours de la formation des grains qu'elles sont les plus importantes (tabl. 2).

TABLEAU 2

Effet de la limitation de la diffusion gazeuse sur le rendement du pois
(limitation pendant une journée à un intervalle de temps variable après la plantation)
(d'après ERICKSON et VAN DOREN, 1960)

Jours après la plantation	Rendement (en grammes)	
	Matière sèche de la plante à la récolte	Poids de grains/plante (matière fraîche)
12	19,6	20,5
14	21,0	19,4
27	20,0	20,1
36	22,3	25,2
43	21,1	21,5
54 (floraison)	14,3	15,6
69	19,5	13,4
71	19,0	17,0
Témoin	25,0	21,9

N. B. : Début de la floraison au 56e jour.

La connaissance du comportement des différentes cultures en conditions d'excès d'eau est indispensable au praticien ; cette nécessité a orienté les travaux de nombreux chercheurs vers l'étude des réactions des plantes à l'ennoyage, envisagée plus spécialement sous les aspects période d'incidence pour le végétal et durée de la contrainte. Les renseignements disponibles concernent surtout les céréales (SKAZKIN et FEDOROVA, 1961 ; STEFANOVSKI, 1963, 1964, 1965 ; ALEKSANDROVA et SKAZKIN, 1964) et les cultures fourragères (BOLTON et MCKENZIE, 1946 ; DAVIS et MARTIN, 1949).

Les résultats de SAVITZKAYA (1959) indiquent que l'effet dépressif sur le rendement final de l'Orge est important si l'ennoyage a lieu au cours de la période qui va de la formation des épillets à l'apparition des étamines (rendement réduit à 35 p. 100 de celui du témoin) ainsi qu'au stade suivant jusqu'à la formation des anthères (rendement 55 p. 100 du témoin) ; l'excès d'eau à des époques plus tardives ne présente pas le même caractère de gravité. Par ailleurs, l'auteur a déterminé le rapport (eau libre/eau liée) dans le tissu végétal et l'a utilisé comme indice de l'activité physiologique ; ainsi ce rapport, voisin de celui du témoin aux phases peu affectées par l'ennoyage, diminue très nettement pendant les périodes sensibles (augmentation de l'eau liée, diminution de l'eau libre).

Pour le Maïs (JOSHI et DASTANE, 1965, 1966 ; PEEV *et al.*, 1968), les résultats obtenus permettent de dégager les observations suivantes :

— après la période de germination qui, comme chez tous les végétaux, est gravement affectée par l'excès d'eau, la sensibilité décroît mais reste tout de même notable, en particulier au stade préfloraison (réduction du rendement en grains de 31 p. 100, de la teneur en protéines des graines de 6 p. 100) et à un degré moindre au stade grain pâteux ;

— au cours des périodes plus tardives, les effets de l'ennoyage affectent peu l'aspect extérieur des plantes mais modifient les processus physiologiques (respiration, activités enzymatiques, absorption et transfert des substances nutritives) ;

— à durée égale, un ennoyage intermittent est moins préjudiciable qu'un ennoyage continu.

Le Tabac est une plante très sensible. Un ennoyage de durée supérieure à 48 heures réduit la récolte à moins de 40 p. 100 de celle de cultures non ennoyées ; les effets sont plus marqués au stade 12 feuilles qu'au stade 17 feuilles (CAMPBELL, 1973). L'ennoyage influe également sur la qualité de la récolte, entraînant des modifications des teneurs en sucres réducteurs et alcaloïdes totaux.

Les sols de nombreuses régions sont caractérisés par un faible drainage naturel et/ou un engorgement prolongé du fait de leur position topographique. Ils sont souvent occupés par une médiocre végétation prairiale, donnant une production réduite et de faible valeur nutritive ; de plus, le surpâturage provoque rapidement le remplacement par des mauvaises herbes des espèces fourragères adaptées. Les rendements pourraient cependant être augmentés dans des proportions importantes par l'implantation de cultures fourragères pérennes utilisant des espèces capables de supporter une période de submersion.

Dans une optique d'amélioration de la flore fondée sur son adaptation aux conditions particulières du milieu, la tolérance des différentes espèces apparaît donc comme l'élément déterminant ; aussi de nombreuses recherches ont été entreprises pour préciser ce caractère (BOLTON et MCKENZIE, 1946 ; DAVIS et MARTIN, 1949 ; HEINRICHS et MCKENZIE, 1949 ; HUMPHRIES, 1962).

D'autre part, MCKENZIE (1951) a étudié l'aptitude à la survie de différentes graminées et légumineuses soumises à des périodes d'ennoyage de durée variable (7 à 63 jours), appliquées à divers stades de développement. Les résultats obtenus permettent d'établir, pour des conditions pédo-climatiques données, un classement relatif des espèces étudiées (tabl. 3) et de donner ainsi des indications pratiques sur les tendances observées :

— la sensibilité à l'ennoyage de légumineuses est supérieure à celle des graminées mais à l'intérieur de ces deux familles, les variations interspécifiques et même intervariétales peuvent être grandes ; ce comportement a été confirmé à plusieurs reprises (MITTRA et STRICKLER, 1961 ;

GILBERT et CHAMBLEE, 1965 ; HOVELAND et WEBSTER, 1965 ; BEARD et MARTIN, 1970 ; HEINRICHS, 1970) ;

— la tolérance à l'excès d'eau semble bien être une caractéristique propre à la plante puisque le classement des espèces reste le même aux différents stades végétatifs.

TABLEAU 3

Tolérance (en jours) *à un ennoyage de printemps de quelques graminées et légumineuses à 3 stades de leur développement*

(d'après McKENZIE, 1951)

Nom	Plantes à maturité	Plantules	Graines en germination
Trifolium pratense L.	7-14	—	0-7
Medicago media L.	14-21	—	7-14
Melilotus alba DESV.	10-14	—	7-14
Trifolium hybridum L.	14-21	—	7-14
Trifolium fragiferum L.	—	—	7-21
Dactylis glomerata L.	14-21	—	—
Agropyrum intermedium BEAUV.	21-35	14-21	21-28
Elymus junceus FISCH.	21-35	21-35	21-35
Festuca rubra L.	21-35	21-35	—
Agropyrum elongatum BEAUV.	35-49	21-35	35-56
Festuca elatior L.	35-63	49-63	21-42
Phleum pratense L.	49-63	21-35	21-56
Agropyrum Smithii RYDB.	49-63	—	—
Phalaris arundinacea L.	49 +	35-49	35-56
Elymus triticoides BUCKL.	—	—	35-42

3. — *Influence des conditions de milieu*

En Finlande, KAITERA (1941) rapporte que, fin avril-début mai, période où le sous-sol est encore gelé, le Trèfle peut résister deux semaines à l'inondation et la Fléole supporte sans dégâts des périodes d'excès d'eau beaucoup plus longues. Par contre, pendant la saison de croisssance active, ces mêmes cultures sont très rapidement endommagées. Cette première observation montre donc que, pour une même espèce, la notion de tolérance qui dépend des stades de croissance et de développement est sans doute aussi fortement modulée par les conditions du milieu, en particulier par le facteur thermique.

Les essais déjà cités de McKENZIE (1951) confirment par ailleurs cette influence ; en effet, suivant l'année de référence (essais réalisés deux années de suite), l'auteur remarque de notables différences de tolérance pour les mêmes espèces. Ainsi, la Fétuque des prés détruite à 55 p. 100 la première année après 49 jours d'ennoyage, n'a pas souffert l'année suivante après 63 jours d'un traitement identique ; les mêmes écarts sont observés avec toutes les espèces. Ces différences de comportement s'expliquent logiquement sur la base des températures moyennes enregistrées pendant les périodes de submersion au cours des deux années et des besoins en oxygène des végétaux, qui sont faibles aux basses températures mais deviennent plus importants avec l'augmentation de la température et de l'activité des plantes.

Ces observations globales obtenues au champ ont été précisées, en conditions contrôlées, par des études analytiques faisant varier le paramètre température de l'eau de submersion (FINN

et al., 1951 ; GILBERT et CHAMBLEE, 1965 ; BEARD et MARTIN, 1970). La figure 11 résume les résultats d'un essai comparant le comportement à l'ennoyage pour 3 températures de l'eau (10°C, 20°C et 30°C) de quatre graminées (Agrotis des Marais, Pâturin des prés, Pâturin annuel, Fétuque rouge). A 25°C, la Luzerne et le Sainfoin disparaissent après un ennoyage de quatre semaines, alors que leur pourcentage de survie est respectivement de 95 et 54 p. 100 à 13°C (HEINRICHS, 1972).

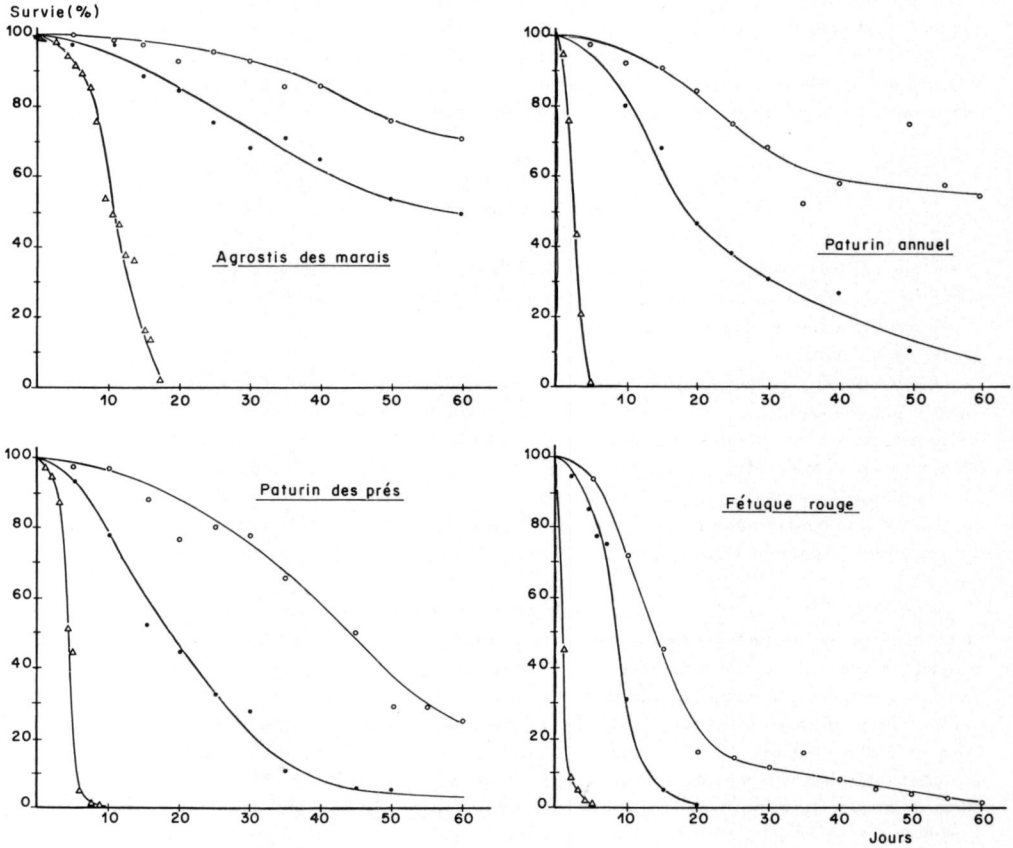


FIG. 11. — *Influence de la durée de la submersion et de la température de l'eau sur le pourcentage de survie de 4 graminées* (d'après BEARD et MARTIN, 1970)

○ 10°C
● 20°C
△ 30°C

Pour tous les végétaux, le facteur température présente une importance considérable car il conditionne de façon directe la vitesse d'apparition et l'étendue des dégâts causés aux plantes. C'est ainsi que KRAMER et JACKSON (1954) notent les différences suivantes chez des plants de Tabac soumis à deux traitements d'ennoyage (1er lot de pots à 20°C, 2e lot à 34°C) :

— les plantes du deuxième lot présentent une chlorose plus sévère et un flétrissement plus marqué pendant toute la durée du traitement (6 jours) ;

— après 24 heures de submersion dans l'eau à 34°C, la croissance des parties aériennes est arrêtée alors qu'elle continue à la même vitesse pendant les 6 jours de traitement à 20°C ;

— à la fin de l'expérience, les systèmes radiculaires des plantes du deuxième lot se trouvent

en si mauvais état qu'il est impossible de mesurer leur perméabilité de façon précise ; par contre, les racines placées à 20°C paraissent peu affectées par le traitement mais leur perméabilité à l'eau est faible (obstruction du xylème).

Les autres facteurs de l'environnement, en particulier l'énergie lumineuse, modifient également le comportement des plantes mais leur action a été beaucoup moins étudiée que celle du facteur température. Des expériences réalisées par ERICKSON et VAN DOREN (1960), qui considèrent les interactions entre l'approvisionnement en oxygène et l'intensité lumineuse, ont montré que la Tomate est plus particulièrement sensible au moment où elle est soumise à une forte insolation, c'est-à-dire quand le taux de photosynthèse et la transpiration sont élevés. De même, selon WILLIAMSON et SPLINTER (1969), la survie du Tabac, soumis à une aération déficiente du sol, est largement sous la dépendance à la fois de la température et de la luminosité.

CONCLUSIONS

Dans les sols saturés d'eau, l'aération déficiente, la transformation physique du milieu, la présence de substances toxiques provoquent des troubles de l'activité racinaire.

L'alimentation hydrique et minérale est toujours affectée, les différents métabolismes de la plante sont perturbés.

En particulier, le métabolisme respiratoire subit de profondes modifications. Chez certaines espèces peu résistantes à l'ennoyage, la glycolyse conduit à la formation d'acétaldéhyde puis d'éthanol qui s'accumule et le cycle de l'acide citrique est bloqué ; on observe, par contre, chez des espèces plus tolérantes, une augmentation des teneurs en acide malique, qui n'est pas toxique pour la plante. Ce sont des adaptations métaboliques de ce type qui permettent à certaines espèces de résister à la contrainte « excès d'eau », davantage sans doute qu'une adaptation simplement morphologique, comme celle qui résulterait du développement d'espaces lacunaires dans les racines.

Une plante présente toujours une plus grande sensibilité au moment où son activité est elle-même maximale. Les facteurs de l'environnement (température, luminosité) qui agissent sur cette activité exercent donc une influence sur son comportement.

Les exemples présentés dans le mémoire montrent combien les rendements des cultures, la qualité des récoltes peuvent être affectés par l'ennoyage. Comment minimiser de tels effets? La solution la plus évidente consiste à chercher à en éliminer la cause, par l'amélioration des conditions de milieu ou le drainage, chaque fois que cela est possible ; mais, même en ce cas, des risques d'excès d'eau de courte durée subsistent. La connaissance des périodes de l'année pendant lesquelles un engorgement du sol est à craindre et des moments de plus grande sensibilité des espèces végétales devrait permettre, dans les autres situations, une meilleure adaptation du système de culture. Le choix aisé entre espèces, enfin la sélection éventuelle de variétés tolérantes à l'excès d'eau sont concevables mais supposent la mise au point de tests simples de sensibilité ; celle-ci sera possible grâce à l'acquisition de données relatives aux comportements des plantes, aux modifications morphologiques que l'on peut observer, aux déviations métaboliques qui sont susceptibles d'intervenir.

Reçu pour publication en mai 1976.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement M. JOLIVET (Laboratoire du Métabolisme intermédiaire et de Nutrition minérale, Département de Physiologie végétale, Versailles, I.N.R.A.) et M. DECAU (Station d'Agronomie de Toulouse, I.N.R.A.) qui nous ont fait bénéficier de leurs conseils lors de la réalisation de cette revue bibliographique.

SUMMARY

EFFECTS OF EXCESS MOISTURE ON PLANT BEHAVIOUR AND THEIR CONSEQUENCES

Temporary excess moisture in the soil can often be a nuisance in agriculture ; ft results i rom unfavourable conditions related to climate, land forms or even soil constitution.

Excess moisture induces deep changes in the soil-root system ; plant activity is perturbed as a result of the rapidly occuring lack of oxygen, which in turn causes modified physico-chemical and biological properties in the soil, and also as a result of physical changes in the environnement.

As a consequence, morphological symptoms appear, though often not very distinctive. The water and mineral nutrients supply is always affected and the various metabolic processes in the roots are also perturbed.

Great differences in behaviour can be noted between species. Actually, some of them are able to resist to the stress of this « excess moisture » through a metabolic adaptation (organic acids metabolism) ; a morphological adaptation occur, thus for instance gaps were described in the roots.

The agricultural consequences of this excess moisture in the soil may sometimes be very serious. However, they vary according to the length of the period, the moment it takes place in the life cycle of the plant and the atmospheric conditions.

ZUSAMMENFASSUNG

PFLANZENREAKTIONEN AUF ÜBERSCHÜSSIGES WASSER UND NACHWIRKUNGEN

Die Landwirtschaft wird häufig durch das vorlaüfig vorhandene, überschüssige Wasser im Boden behindert ; dies kommt infolge ungünstiger Verhältnisse zustande, die Klima, Topographie oder Bodenbeschaffenheit selbst betreffen.

Das überschüssige Wasser verändert wesentlich den Wurzelraum ; durch das schnelle Verschwinden des Sauerstoffs, die nachfolgenden Veränderungen der physiko-chemischen und biologischen Bodeneigenschaften, die physikalische Raumumwandlung wird die Pflanzenaktivität gestört.

Dies tritt in Erscheinung durch morphologische Symptome, die übrigens oft wenig kennzeichnend sind-Die Wasser- und Mineralversorgung wird immer beeintrachtigt, die verschiedenen Wurzelstoffwechsel sind gestört.

Beträchtliche Verhaltensunterschiede sind zwischen den verschiedenen Arten zu beobachten. Einige können tatsächlich der Belastung « Überfeuchtigkeit » mittels einer Stoffwechselanpassung widerstehen (Stoffwechsel der organischen Säuren) ; eine mögliche morphologische Anpassung durch Bildung von Wurzelhohlräumen wird ebenfalls beschrieben.

Die landwirtschaftlichen Nachwirkungen der Überfauchtigkeit sind manchmal von grosser Bedeutung-Jedoch sind sie verschieden je nach der Überfeuchtigkeitsdauer, ihrem Auftretenzeitpunkt im Pflanzenleben und den Unweltwitterungsverhältnissen.

РЕЗЮМЕ

Реакции растений на избыток влаги и последствия этих реакций. — Библиографическая заметка.

К. ДЮТИОН, М. МЕНЖО.

Сельское хозяйство часто испытывает затруднения связанные со временным избытком влаги в почве, зависящим от климата, топографии и строения самой почвы.

Избыток влаги всегда сильно ухудшает условия среды корнеобитания; быстрое исчезновение кислорода, изменение физико- химических и биологических свойств самой почвы и физическое изменение среды вызванные этим избытком, нарушают активность растений.

Это проявляется в форме часто мало характерных но видимых морфологических симптомов. Всегда затрагивается водное и минеральное питание растений и нарушаются разные корневые метаболизмы.

Наблюдаются большие различия в поведении растений принадлежащих к разным видам. Некоторые из них сопротивляются « насилию » вызванному избытком влаги, и стараются приспособить к нему свои разные метаболизмы (метаболизм органических кислот); описываются также и возможности морфологической приспособленности, вызывающейся развитием незаполненных пространств в корнях.

Сельскохозяйственные последствия затоплений часто очень велики. Они изменяются в зависимости от их продолжительности, от возраста растений в эти моменты и от атмосферических условий окружения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALEKSANDROVA A. Z., SKAZKIN F. D., 1964. Effect of waterlogging of soil on barley at various periods of development. *Dokl. Akad. Nauk.*, **159**, 205-207 (in *Soils Fertil.*, **28**, 1596).

ALEXANDER A. G., SAMUELS G., SPAIN G. L., MONTALVO-ZAPATA R., 1972. Physiology of sugarcane under water stress : invertase, ATP-ase and amylase behavior in plants experiencing water deficiency, night flooding and continuous flooding. *J. Agric. Univ. P. Rico*, **56**, 115-133.

ARMSTRONG W., 1964. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants. *Nature*, **204**, 801-802.

ARMSTRONG W., 1967. The use of polarography in the assay of oxygen diffusing from roots in anaerobic media. *Physiol. Plant.*, **20**, 540-553.

ARNON D. I., 1937. Ammonium and nitrate nitrogen nutrition of barley at different seasons in relation to hydrogen ion concentration, manganese, copper and oxygen supply. *Soil Sci.*, **44**, 91-113.

AUBERTIN G. M., RICHMAN R. N., LETEY J., 1966. Plant ethanol content as an index of the soil-oxygen status. *Agron. J.*, **58**, 305-307.

BARBER D. A., EBERT M., EVANS N. T. S., 1962. The movement of O^{15} through barley and rice plants. *J. exp. Bot.*, **13**, 397-403.

BAIEROVA J., KOHL J. G., 1974. Zur induktion neuer ADH-isoenzyme in der Maiswurzel bei partieller anaerobiose. *Wiss Z. Humboldt-Univ. Berlin, math. nat. Reihe*, **23**, 621-624.

BARTLETT R. J., 1961. Iron oxidation proximate to plant roots. *Soil Sci.*, **92**, 372-379.

BEARD J. B., MARTIN D. P., 1970. Influence of water temperature on submersion tolerance of four grasses. *Agron. J.*, **62**, 257-259.

BEEVERS H., 1961. *Respiratory metabolism in plants.* Row Peterson, Biological Monographs, Evanston, Illinois.

BERGMAN H. F., 1959. Oxygen deficiency as a cause of disease in plants. *Bot. Rev.*, **25**, 417-485.

BERRY L. J., 1949. The influence of oxygen tension on the respiratory rate in different segments of onion roots. *J. Cell. Comp. Physiol.*, 33-41.

BÉTREMIEUX P., 1951. Étude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. agron.*, Série A, **2**, 193-295.

BOLTON E. F., ERICKSON A. E., 1970. Ethanol concentration in tomato plants during soil flooding. *Agron. J.*, **62**, 220-224.

BOLTON J. L., MACKENZIE R. E., 1946. The effect of early spring flooding on certain forage crops. *Sci. Agron.*, **26**, 99-105.

CAMPBELL R. B., 1973. Flue-cured Tobacco yield and oxygen content of soil in lysimeters flooded for various periods. *Agron. J.*, **65**, 783-786.

CANNON W. A., 1925. Physiological features of roots with special references to the relation of roots to the aeration of soil. *Carnegie. Inst. Wash. Pub.*, **368**, 1-168.

CHANG H. T., LOOMIS W. E., 1945. Effect of CO_2 on absorption of water and nutrients by roots. *Plant Physiol.*, **20**, 221-232.

CLINE R. A., ERICKSON A. E., 1959. The effect of oxygen diffusion rate and applied fertilizer on the growth, yield and chemical composition of peas. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 333-335.

COULT D. A., 1964. Observations on gas movement in the rhizome of *Menyanthes trifoliata* L. with comments on the role of the endodermis. *J. Exp. Bot.*, **15**, 205-218.

COULT D. A., VALLANCE K. B., 1958. Observations on the gaseous exchanges which take place between *Menyanthes troifoliata* and its environment. *J. Exp. Bot.*, **9**, 384-402.

CRAWFORD R. M. M., 1966. The control of anaerobic respiration as a determining factor in the distribution of the genus Senecio. *J. Ecol.*, **54**, 403-413.

CRAWFORD R. M. M., 1967. Alcohol dehydrogenase activity in relation to flooding tolerance. *J. Exp. Bot.*, **18**, 458-464.

CRAWFORD R. M. M., 1969. The physiological basis of flooding tolerance. *Berdt. bot. Ges.*, **82**, 111-114.

CRAWFORD R. M. M., MCMANMON M., 1968. Inductive responses of alcohol and malic dehydrogenases in relation to flooding tolerance in roots. *J. Exp. Bot.*, **19**, 435-441.

CRAWFORD R. M. M., TYLER P. D., 1969. Organic acid metabolism in relation to flooding tolerance in roots. *J. Ecol.*, **57**, 235-244.

DANIELSON R. E., RUSSELL M. B., 1957. Ion absorption by corn roots as influenced by moisture and aeration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 3-6.

DAVIS A. G., MARTIN B. F., 1949. Observations on the effect of artificial flooding on certain herbage plants. *J. British Grassl. Soc.*, **4**, 63-64.

DEYSSON G., 1966. *Physiologie et biologie des plantes vasculaires*. III. I. Nutrition et métabolisme. Sedes, Paris, 243-273.

DUBUY H. G., OLSON R. A., 1940. The relation between respiration, protoplasmic streaming and auxin transport in the *Avena* coleoptile rising a polarographic microrespirometer. *Amer. J. Bot.*, **27**, 401-413.

ERICKSON A. E., VAN DOREN D. M., 1960. The relation of plant growth and yield to soil oxygen availability. *Trans. 7th intern. Congress Soil Science*, Madison, Wisc., U.S.A., III, 428-434.

EVANS N. T. S., EBERT M., 1960. Radioactive oxygen in the study of gas transport down the root of *Vicia faba*. *J. Exp. Bot.*, **11**, 246-257.

FINN B. J., BOURGET S. J., NIELSEN K. F., DOW B. K., 1951. Effect of different soil moisture tension on grass and legume species. *Canad. J. Soil Sc.*, **41**, 16-23.

FLOCKER W. J., VOMOCIL J. A., HOARD F. D., 1959. Some growth responses of tomatoes to soil compaction. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 188-191.

FORD H. W., 1965. Bacterial metabolites that affect citrus root survival in soils subject to flooding. *Proc. Amer. Soc. hort. Sci.*, **86**, 205-212.

FRANCIS C. H., DEVITT A. C., STEELE P., 1974. Influence of flooding on the alcohol dehydrogenase activity of roots of *Trifolium subterraneum* L. *Aust. J. Plant Physiol.*, **1**, 9-13.

FREED M., TENSHO K., ZSOLDOS F., 1965. Effect of reducted oxygen tension on the uptake of inorganic ions by rice and barley. In *Isotopes and radiation in soil-plant nutrition studies*, 233-240. International atomic Energy Agency, Vienne.

FULTON J. M., ERICKSON A. E., 1964. Relation between soil aeration and ethyl alcohol accumulation in xylem exudate of tomatoes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 610-614.

FULTON J. M., ERICKSON A. E., TOLBERT N. E., 1964. Distribution of C14 among metabolites of flooded and aerobically grown tomato plants. *Agron. J.*, **56**, 527-529.

GEISLER G., 1967. Interactive effects of CO_2 and O_2 in soil on root and top growth of barley and peas. *Plant Physiol.*, **42**, 305-307.

GILBERT W. B., CHAMBLEE D. S., 1965. Effect of submersion in water on Tall Fescue, Orchard grass and Ladino Clover. *Agron. J.*, **57**, 502-504.

GRASMANIS V. O., 1958. *a*) Manganese excess and bark necrosis in pears. *J. austr. Inst. Agric. Sci.*, **24**, 347-349. *b*) Manganese excess and bark necrosis in apples, *ibid.*, 350-351.

GRAVEN E. H., ATTOE O. J., SMITH D., 1965. Effect of liming and flooding on manganese toxicity in alfalfa. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 702-706.

GREENWOOD D. J., 1967. Studies on the transport of oxygen through the stems and roots of vegetable seedlings. *New Phytol.*, **66**, 337-347.

GREENWOOD D. J., 1968. Effect of oxygen distribution in the soil on plant growth. In W. J. Whittington *Root Growth*, Butterworth, Londres, 202-223.

GREENWOOD D. J., GOODMAN D., 1971. Studies on the supply of oxygen to the roots of mustard seedlings (*Sinapis Alba* L.). *New Phytol.*, **70**, 97-101.

HAMMER K. C., 1936. Effects of nitrogen supply on rates of photosynthesis and respiration in plants. *Botan. Gaz.*, **97**, 744-764.

HARRIS D. G., VAN BAVEL C. H. M., 1957. Nutrient uptake and chemical composition of tobacco plants as affected by the composition of the root atmosphere. *Agron. J.*, **49**, 176-181.

HEINRICHS D. H., 1970. Flooding tolerance of legumes. *Canad. J. Plant Sci.*, **50**, 435-438.

HEINRICHS D. H., 1972. Root-zone temperature effects on flooding tolerance of legumes. *Canad. J. Plant Sci.*, **52**, 985-990.

HEINRICHS D. H., MCKENZIE R. E., 1949. The effect of flooding on the emergence of reed canary grass seed. *Sci. Agron.*, **27**, 171-174.

HOAGLAND C. R., BROYER T. C., 1936. General nature of the process of salt accumulation by roots with description of experimental methods. *Plant Physiol.*, **11**, 471-507.

HOPKINS H. T., SPECHT A. W., HENDRICKS S. B., 1950. Growth and nutrient accumulation as controled by oxygen supply to plant roots. *Plant Physiol.*, **25**, 193-209.

HOVELAND C. S., WEBSTER H. L., 1965. Flooding tolerance of annual clovers. *Agron. J.*, **57**, 3-4.

HUCK M. G., 1970. Variation in taproot elongation rate as influenced by composition of the soil air. *Agron. J.*, **62**, 815-818.

HUMPHRIES A. W., 1962. The growth of some perennial grasses in waterlogged soils. I. The effect of waterlogging on the avaibility of nitrogen and phosphorus to the plants. *Austral. J. Agric. Res.*, **13**, 414-425.

JENSEN C. R., KIRKHAM D., 1963. Labeled oxygen increased diffusion rate through soil containing growing roots. *Science*, **141**, 735-736.

JENSEN C. R., STOLZY L. H., LETEY, 1967. Tracer studies of oxygen diffusion through roots of barley, corn and rice. *Soil Sci.*, **103**, 23-29.

JENSEN C. R., LUXMOORE R. J., VAN GUNDY S. D., STOLZY L. H., 1969. Root air space measurements by a pycnometer method. *Agron. J.*, **61**, 474-475.

JOSHI M. S., DASTANE N. G., 1965. Excess water tolerance of summer cereals. *Ind. J. Agron.*, **10**, 289-298.

JOSHI M. S., DASTANE N. G., 1966. Effect of different durations of flooding at different stages of growth under different lay outs on growth, yield and quality of maize. *Ind. J. Agron.*, **11**, 70-79.

KAITERA P., 1941. In LUTHIN J. N., 1957. *Drainage of agricultural lands*, p. 535. American Society of Agronomy, Madison.

KITA D., KAWAGUCHI K., 1960. The effects of the reduction of soil under waterlogged conditions and the dehydration of the reduced soil on soil structure. *Soil and plant Food*, **6**, 190-191 (in *Soils Fertil.*, **25**, 212).

KOPECKY J., 1927. In BAVER L. D., 1956. *Soil Physics*, p. 203. John Wiley and Sons, New York.

KRAMER P. J., 1949. *Plant and soil water relationships*, p. 142-152 et 220-227. MCGRAW-HILL, Book Company, Londres.

KRAMER P. J., 1951. Causes of injury to plants resulting from flooding. *Plant Physiol.*, **26**, 722-736.

KRAMER P. J., JACKSON W. T., 1954. Causes of injury to flooded tobacco plants. *Plant Physiol.*, **29**, 241-245.

LAWTON K., 1946. The influence of soil aeration on the growth and absorption of nutrients by corn plants. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **10**, 263-268.

LEGGETT J. E., STOLZY L. H., 1961. Anaerobiosis and sodium accumulation. *Nature*, **192**, 991-992.

LEMON E., KRISTENSEN J., 1960. An edaphic expression of soil structure. *Trans. 7th intern. Congress of Soil Science*, Madison, U.S.A., I, 232-240.

LETEY J., LUNT O. R., STOLZY L. H., SZUSZKIEWICZ T. E., 1961. Plant growth, water use and nutritional response to rhizosphere differentials of oxygen concentration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 183-186.

LETEY J., STOLZY L. H., VALORAS N., SZUSZKIEWICZ T. E., 1962. Influence of oxygen diffusion rate on sunflower growth at various soil and air temperatures. *Agron. J.*, **54**, 316-319.

LETEY J., STOLZY L. H., LUNT O. R., YOUNGNER V. B., 1964. Growth and nutrient uptake of Newport bluegrass as affected by soil oxygen. *Plant and Soil*, **20**, 143-148.

LETEY J., STOLZY L. H., VALORAS N., 1965. Relationships between oxygen diffusion rate and corn growth. *Agron. J.*, **57**, 91-92.

MCKENZIE R. E., 1951. The ability of forage plants to survive early spring flooding. *Sci. Agr.*, **31**, 358-367.

MCMANMON M., CRAWFORD R. M. M., 1971. A metabolic theory of flooding tolerance : the significance of enzyme distribution and behaviour. *New Phytol.*, **70**, 299-306.

MCPHERSON D. C., 1939. Cortical air spaces in the roots of *Zea mays* L. *New Phytol.*, **38**, 190-202.

MARSHALL D. R., BROVE P., PRYOR A. J., 1973. Adaptative significance of alcohol dehydrogenase isozymes in maize. *Nature New Biol.*, **244**, 16-17.

MILLER S. A., MAZURAK A. P., 1958. Relationships of particle and pore sizes to the growth of sunflowers. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 275-278.

MITSUI S., KUMAZAWA K., YAZAKI J., HIRATA H., ISHUZUKA K., 1962. Dynamic aspects of N, P, K uptake and O_2 secretion in relation to the metabolic pathways within the plant roots. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **8**, 25-30.

MITTRA M. K., STRICKLER F. C., 1961. Excess water effects on different crops. *Trans. Kans. Acad. Sci.*, **64**, 275-286.

MORIZET J., ROBELIN M., 1972. La poussée radiculaire. Déterminations, mécanisme, implications *Ann. agron.*, **23**, 479-496.

NANCE J. P., 1949. A comparaison of carbohydrate loss and carbon dioxide production during fermentation by barley roots. *Amer. J. Bot.*, **36**, 274-276.

NG SIEW KEE, BLOOMFIELD C., 1962. The effect of flooding and aeration on the mobility of certain trace elements in soils. *Plant and Soil*, **16**, 108-135.

PATRICK Z. A., 1955. The peach replant problem in Ontario : toxic substances from microbial decomposition product of peach roots residues. *Canad. J. Bot.*, **33**, 461-486.

PEEV H., KOLEV V., GOTEVA M., 1968. Influence of superfluous soil moisture on the development of maize. *Nautsh. Trud. Diss. Selskod. Inst. « George Dimitrov »*, **19**, 75-76.

PÉRIGAUD S., 1967. Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur la croissance et la nutrition globale de la plante. *Ann. agron.*, **18**, 485-506.

PITMAN M. G., 1969. Adaptation of barley roots to low oxygen supply and its relation to potassium and sodium uptake. *Plant Physiol.*, **44**, 1233-1240.

PONNAMPERUMA F. H., 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, **24**, 29-96.

RAY P. M., 1958. Destruction of auxin. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **9**, 81-118.

ROWE R. M., 1966. *Anaerobic metabolism and cyanogenic glycoside hydrolysis in differential sensitivity of peach, plum and pear roots to water satured conditions.* Thesis 104 pages, Ph. D. University of Californy, Davis.

SALESSES G., JUSTE C., 1970. Recherches sur l'asphyxie radiculaire des arbres fruitiers à noyau. I. Rôle éventuel de certaines substances présentes dans les racines de pêcher *P. Persica*. *Ann. Amélior. Plantes*, **20**, 87-103.

SALESSES G., JUSTE C., 1971. Recherches sur l'asphyxie radiculaire des arbres fruitiers à noyau. II. Comportement des porte-greffes du type pêcher et prunier : étude de leur teneur en amygdaline et des facteurs intervenant dans l'hydrolyse de celle-ci. *Ann. Amélior. Plantes*, **21**, 265-280.

SAVITZKAYA N. N., 1959. The effect of excessive moistening of the soil on barley plants at different periods of their development. *Dokl. Akad. Nauk.*, **128**, 850-852.

SENEWIRATNE S. T., MIKKELSEN D. S., 1961. Physiological factors limiting growth and yield of *Oryza sativa* under unflooded conditions. *Plant and Soil*, **14**, 127-146.

SHALHEVET J., ZWERMAN P. J., 1959. Nitrogen response of corn under variable conditions of drainage. A preliminary greenhouse study. *Soil Sci.*, **85**, 255-260.

SHIVE J. W., 1941. Balance of ion and oxygen tension in nutrient substrate for plants. *Soil Sci.*, **51**, 445-460.

SIEGEL S., 1961. Effect of reduced oxygen tension on vascular plants. *Physiol. Plant.*, **14**, 554-557.

SKAZKIN F. D., FEDOROVA J. N., 1961. Effect of nitrogen and of excess moistening of soil on some physiological process and yield of barley in relation to its phasal development. *Dok. Akad. Nauk.*, **139**, 1476-1479.

SMITH K. A., RUSSELL R. S., 1969. Occurance of ethylene and its significance in anaerobic soil. *Nature*, **222**, 769-771.

SOWELL W. F., ROUSE R. D., 1958. Effect of Na on cation content of leaves and boll production of cotton plants grown in solution cultures in growth chamber. *Soil Sci.*, **86**, 70-74.

STEFANOVSKI I. A., 1963. Resistance of spring wheat to excess moisture at various stages of growth. *Agrobiologiya*, **5**, 778-779.

STEFANOVSKI I. A., 1964. Effect of mineral fertilizer on yield of spring wheat under waterlogged conditions. *Agrokimiya*, **9**, 89-92 (In *Soils Fertil.*, **28**, 2552).

STEFANOVSKI I. A., 1965. Resistance of grain crops to waterlogging. *Westn. s. kh. Nauki*, **3**, 56-60 (In *Soils Fertil.*, **28**, 3071).

STENGEL P., MARTY J. R., BOSC M., BLANCHET R., 1972. Conséquenees d'ennoyages temporaires liés à la microtopographie de sols peu perméables à l'égard de quelques cultures. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 92-100.

STEWARD F. C., BERRY N. E., BROYER T. C., 1936. The absorption and accumulation of solutes by living plant cells. VIII. The effect of oxygen upon respiration and salt accumulation. *Ann. Bot.*, **50**, 345-366.

TAKAI Y., KAMURA T., 1966. The mechanism of reduction in waterlogged paddy soil. *Folia microbiol.*, **11**, 304-313.

TAKIJIMA Y., 1964. Studies on organic acids in paddy field soils with their reference to their inhibitory effects on the growth of rice plants. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **10**, 14-29 (In *Soils Fertil.*, **28**, 2261).

TAKIJIMA Y., SAKUMA H., CHIBA M., 1961. Metabolism of organic acids in soils of paddy fields and their inhibitory effects on rice growth. *J. Sci. Soil* (Tokyo), **32**, 390-394.

TYLER P. D., CRAWFORD R. M. M., 1970. The role of shikimic acid in waterlogged roots and rhizomes of *Iris Pseudacorus* L. *J. Exp. Bot.*, **21**, 677-682.

VAN DER HEIDE H., DE BOER-BOLT B. M., VAN RAALTE M. H., 1963. The effect of low oxygen content of the medium on the roots of barley seedlings. *Acta Bot. Neel.*, **12**, 231-247.

VAN OVERBEEK J., 1959. Auxins. *Bot. Rev.*, **25**, 269-350.

VAN'T WOUDT B. D., HAGAN, R. M. 1957. Land drainage in relation to soils and crops. III. Crop responses at excessively high soil moisture levels. In LUTHIN N. J., *Drainage of agricultural Lands*, 514-578. American Society of Agronomy, Madison.

VARADE S. B., LETEY J., STOLZY L. H., 1971. Growth responses and root porosity of rice in relation to temperature, light intensity and aeration. *Plant and Soil*, **34**, 415-420.

VARTAPETLAN B. B., ANDREEVA I. N., MASLOVA I. P., DAVTIAN N. G., 1970. The oxygen and ultrastructure of root cells. *Agrochimica*, **15**, 1-19.

VILAIN M., 1963. L'aération du sol. *Ann. agron.*, **14**, 967-998.

VLAMIS J., DAVIS A. R., 1953. Germination, growth and respiration of rice and barley seedlings at low oxygen pressures. *Plant Physiol.*, **28**, 685-692.

WAGER H. G., 1961. The effect of anaerobiosis on acids of the tricarboxylic acid cycle in peas. *J. Exp. Bot.*, **12**, 34-46.

WARD G. H., DURKEE A. B., 1956. The peach replant problem in Ontario : amydgaline content in peach root tissues. *Canad. J. Bot.*, **35**, 419-422.

WESSELING J., VAN WIJK W. R., 1957. Land drainage in relation to soils and crops. I. Soil physical conditions in relation to drain depth. In LUTHIN J. N., *Drainage of agricultural lands*, 461-504. American Society of Agronomy, Madison.

WILLEY C. R., 1970. Effects of short periods of anaerobic and near-anaerobic conditions on water uptake by tobacco roots. *Agron. J.*, **62**, 221-229.

WILLIAMS W. T., BARBER D. A., 1961. The functionnal significance of aerenchyme in plants. *Soc. Exp. Biol. Symp.*, **15**, 132-154.

WILLIAMSON R. E., 1968. Influence of gaz mixtures on cell division and root elongation of broad bean *Vicia faba* L. *Agron. J.*, **60**, 317-321.

WILLIAMSON R. E., SPLINTER W. E., 1969. Effect of light intensity, temperature and root gaseous environment on growth of *Nicotiana Tabacum*. *Agron. J.*, **61**, 285-288.

YAMASAKI T., 1952. Studies on the excess moisture injury of upland crops in over moist soil from the view point of soil chemistry and plant physiology. *Natl Inst. Agric. Sci.*, Tokyo, Bull B 1, 192.

YEMM E. W., 1965. The respiration of plants and their organs. In STEWARD F. C., *Plant Physiology*, IV, A 231-310. Academic Press, New York.

Ann. agron., 1976, **27** (2), 247-257.

NOTE TECHNIQUE

DESCRIPTION D'UN POTOMÈTRE ENREGISTREUR, UN EXEMPLE D'OBSERVATIONS PORTANT SUR UNE JOURNÉE

J. MORIZET

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Clermont Ferrand, I. N. R. A.,
12, Avenue de l'Agriculture,
63100 Clermont Ferrand

RÉSUMÉ

On décrit un potomètre enregistreur et son fonctionnement. Les déterminations directes à partir de cet appareil portent sur l'absorption hydrique et le bilan pondéral des parties aériennes.

Avec des données supplémentaires fournies soit par la plante adaptée au potomètre, soit par d'autres plantes cultivées dans les mêmes conditions, on peut calculer la croissance quotidienne des parties aériennes et des racines et construire les courbes journalières du bilan hydrique et de l'évolution des teneurs en eau des parties aériennes.

Un exemple de résultats sur une période de 24 heures est exposé.

INTRODUCTION

L'absorption hydrique par une plante est classiquement mesurée par la méthode potométrique. Les déterminations peuvent porter sur des portions de racines (KRAMER, 1969) ou sur les poils absorbants (CAILLOUX, 1966). Elles sont alors effectuées à l'aide de micropotomètres. Elles peuvent également intéresser l'ensemble du système racinaire.

D'autre part, les mesures d'absorption (diminution du volume de la solution nutritive) peuvent être complétées par des mesures de transpiration (diminution de poids du système) (MINGEAU, 1969).

Cependant, le potomètre classique, quelle que soit sa taille, présente un double désavantage :

— il implique des lectures directes avec les contraintes et les limites dans le temps que cela représente ;

— le dispositif ne permet pas une aération du milieu racinaire qui se trouve très rapidement placé dans des conditions anoxiques.

Quand le suiveur de spot enregistrant l'absorption arrive en bout de course, il déclenche l'ouverture d'une électrovanne placée en aval d'un réservoir de solution jusqu'au rétablissement du poids initial.

II. — DÉTERMINATION ET SIGNIFICATION DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES

1. — *Déterminations directes à partir du potomètre*

a) *Absorption hydrique.*

Par suite de la variation simultanée de niveau dans l'éprouvette et dans le container, la quantité d'eau absorbée A ne correspond pas à la perte de poids de l'éprouvette (*e*), mais elle est une fonction linéaire de celle-ci et donc du déplacement du suiveur de spot comme le montre le calcul ci-dessous :

Soit : S_1, la section du container (*c*) à l'affleurement du liquide,
S_2, la section de l'éprouvette (*e*).

Supposons que la quantité A de liquide absorbé par la plante entraîne, dans le container (*c*), une baisse de niveau de la solution d'une hauteur H (fig. 2). A l'équilibre, le plateau de la balance (b_2) est remonté d'une hauteur *h*.

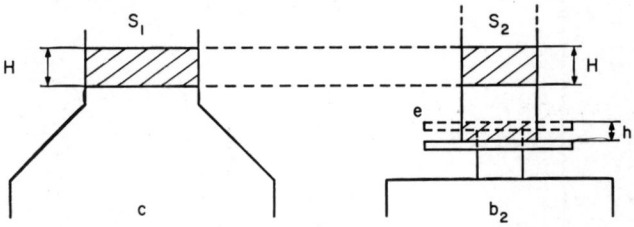


FIG. 2. — *Modifications du niveau de la solution et de la position du plateau de la balance* (b_2) *à la suite de l'absorption d'un volume A de solution*

Le volume de solution absorbé est donné par la relation suivante :

$$A = H S_1 + (H + h) S_2 \tag{1}$$

D'autre part, en écrivant qu'il existe un facteur de proportionalité *k* entre la variation de position du plateau de la balance (b_2) et la variation du poids que supporte ce plateau (on admet que la densité de la solution est égale à 1) :

$$k = \frac{h}{S_2 (H + h)} \tag{2}$$

et en combinant (1) et (2), on a :

$$A = \frac{S_1 + S_2 - kS_1S_2}{K S_2} h \tag{3}$$

Enfin la longueur du « levier optique » assurant à l'enregistrement L une démultiplication du mouvement *h* de la balance telle que :

$$L = a h \tag{4}$$

il existe la relation linéaire suivante entre l'absorption A et le déplacement L de l'enregistreur :

$$A = \frac{S_1 + S_2 - kS_1S_2}{a k S_2} L \tag{5}$$

Sensibilité du système.

La sensibilité s est donnée par :

$$s = \frac{L}{A} = \frac{kS_2}{S_1 + S_2 - kS_1S_2} \tag{6}$$

a — Sa valeur dépend des caractéristiques de la lentille convergente ; dans notre dispositif, $a = 115$;

k — C'est une caractéristique de la balance (b_2). Avec la balance utilisée (METTLER P 160), $k = 0{,}06 \text{ cm} \cdot \text{g}^{-1}$;

S_1 — Si les autres données du système sont constantes et si $S_2 < \frac{1}{k} = 16{,}66$ (cas de notre dispositif comme nous le verrons ci-dessous), s est d'autant plus grand que S_1 est plus petit. Cependant, il est impossible de descendre au-dessous d'une section minimale sous peine de léser les racines quand on les introduit dans le container. En pratique, nous avons adopté $S_1 = 57 \text{ cm}^2$.

S_2 — La sensibilité croît avec S_2 jusqu'à devenir infinie pour la valeur :

$$S_2 = \frac{S_1}{kS_1 - 1} = 23{,}55 \qquad \text{(fig. 3)}$$

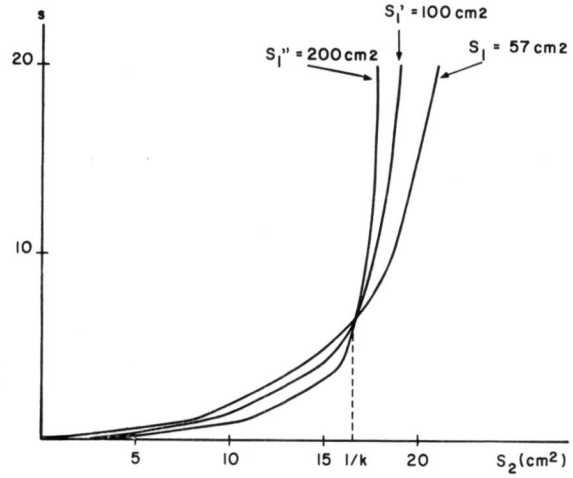


FIG. 3. — *Variation de la sensibilité* s *avec la section S_2 de l'éprouvette e pour différentes sections S_1 du container C*

En fait, pour des raisons pratiques, on ne peut dépasser la valeur de $S_2 = \frac{1}{k}$, qui constitue, sur les courbes $s = f(S_2)$, un point singulier pour lequel s prend une valeur constante égale à $k = 6{,}90$ quelle que soit la valeur de S_1.

En effet, si :

$$\frac{1}{k} < S_2 < \frac{S_1}{kS_1 - 1} \tag{7}$$

lors du remplissage périodique de l'éprouvette, l'équilibrage entre le container et l'éprouvette par l'intermédiaire du siphon se fait par une circulation de la solution dans le sens container vers l'éprouvette. Le spot poursuivant sa course dans le sens amorcé lors du remplissage risque donc de sortir des limites du suiveur de spot. D'autre part, pour obtenir un équilibrage rapide, on a intérêt à se rapprocher aussi près que possible de la valeur $S_2 = \frac{1}{k}$; en effet, pour cette

valeur, le niveau de la solution dans les deux réservoirs ne varie pas, que la plante absorbe de l'eau ou que la solution soit ajoutée dans l'éprouvette ; les variations de hauteur du plateau de la balance (b_2) rendant compte entièrement des fluctuations de volume. Donc, pour cette valeur singulière de S_2, le remplissage périodique de l'éprouvette se traduit par un abaissement du plateau de la balance (b_2) sans que les niveaux de solution, aussi bien dans le container que dans l'éprouvette, ne soient modifiés, ni que des transferts ne se produisent entre ces deux récipients.

En pratique, la section retenue pour S_2 est de : 16,5 cm², ce qui donne une sensibilité de : 6,6 cm · g⁻¹.

Étalonnage.

L'étalonnage est réalisé en prélevant une quantité connue de liquide dans le container (c) et en observant le déplacement résultant du suiveur de spot. Cet étalonnage est effectué au moins une fois par jour en raison des dérives progressives que l'on observe. Ce phénomène est réduit si l'on prend soin de tenir très propres les parois du container et de l'éprouvette au niveau de l'affleurement de la solution.

Précision.

Si l'on admet que la précision est limitée essentiellement par l'erreur commise dans la lecture des enregistrements et que celle-ci est appréciée à un mm près, l'erreur absolue est de :

$$e = \frac{0,1}{s} = \frac{0,1}{6,6} \simeq 0,02 \text{ cm}^3$$

La détermination d'une quantité d'eau absorbée nécessitant deux lectures, l'erreur est doublée, soit 0,04 cm³ $\simeq$ 0,05 cm³.

L'erreur relative dépend de l'importance des débits et du temps pris pour unité. Dans la journée, pendant dix minutes, durée habituellement retenue pour l'exploitation des courbes, une plante ayant une surface foliaire de 5 dm², absorbe, en moyenne, 1 cm³ d'eau. Dans ces conditions, la précision est de :

$$\frac{0,05}{1} = 5 \text{ p. } 100$$

b) *Bilan pondéral des parties aériennes* (matière fraîche).

Les racines étant immergées et ayant une densité voisine de l'unité, on peut admettre que leur poids est négligeable et que la balance (b_1) pèse seulement les parties aériennes de la plante.

Précision.

En faisant la même hypothèse que pour l'absorption (erreur maxima sur la lecture des enregistrements), une lecture peut entraîner une erreur de :

$$e = \frac{0,1}{s} = \frac{0,1}{1,4} = 0,07 \text{ g}$$

L'estimation d'un bilan nécessitant deux lectures peut être entachée d'une erreur de 0,14 g $\simeq$ 0,15 g.

Comparaisons avec les données fournies par un potomètre classique.

On admet souvent qu'un potomètre classique fournit :

— l'absorption A (par lecture de la baisse du niveau de la solution dans un tube gradué),

— la transpiration T (par pesée du système potomètre-plante),

— et que la différence A — T représente le bilan hydrique de la plante entière.

En fait, un calcul rigoureux, tenant compte de la croissance de la plante, indique que A et T ne sont pas exactement identifiables à l'absorption et à la transpiration (mais l'erreur relative est faible) et surtout que A — T représente non pas le bilan hydrique de la plante entière, mais le bilan pondéral en matière fraîche des parties aériennes.

Les données fournies par le potomètre enregistreur sont donc équivalentes à celles déterminées à partir du potomètre classique avec cette différence que les deux grandeurs mesurées directement par le potomètre enregistreur sont A et A — T, d'où l'on déduit T.

2. — *Autres déterminations*

a) *Croissance de la plante.*

Chaque jour, avant l'allumage et à heure fixe, la plante est retirée du potomètre, les racines sont égouttées d'une façon standard pendant une minute et l'ensemble est pesé. On peut ainsi déterminer le bilan pondéral quotidien de la plante entière ΔP_e ; connaissant en outre, grâce à l'enregistrement, le bilan pondéral des parties aériennes ΔP_a, il est possible de calculer le bilan pondéral des racines ΔP_r.

$$\Delta P_r = \Delta P_e - \Delta P_a \tag{8}$$

Les poids en matière fraîche sont déterminés chaque jour, par pesée directe pour la plante entière et, par récurrence à partir des poids finaux pour les parties aériennes et pour les racines.

b) *Teneurs en eau et calcul des poids de matière sèche.*

Les teneurs en eau sont déterminées sur d'autres plantes placées dans les mêmes environnements aérien et racinaire que ceux de la plante du potomètre.

La connaissance de l'évolution dans le temps des teneurs en eau H permet de calculer les gains de poids en matière sèche Δ_m de la plante du potomètre à partir de sa croissance exprimée en matière fraîche ΔM :

$$\Delta_m = \frac{100\ \Delta M}{100 + H} \tag{9}$$

c) *Bilan hydrique des parties aériennes.*

Le bilan hydrique E_t au temps t, se déduit du bilan pondéral M_t par la relation :

$$E_t = M_t - m_t \tag{10}$$

Connaissant M_t à chaque instant (enregistrement du bilan pondéral des parties aériennes), on peut construire la courbe des bilans hydriques si l'on sait calculer m_t. Cette détermination est possible si l'on fait l'hypothèse suivante :

— le gain de matière sèche se répartit d'une façon uniforme sur toute la période de jour et il est nul au cours de la nuit. Cette hypothèse est justifiée par les conditions constantes de l'environnement mais ne tient pas compte des transferts éventuels des produits entre les parties aériennes et les racines au cours de la nuit.

d) *Évolution des teneurs en eau des parties aériennes.*

Ces données acquises, il est possible de connaître l'évolution des teneurs en eau H_i des parties aériennes sur une période de 24 h, en appliquant successivement les relations suivantes qui correspondent à des tranches de temps égales (1 heure par exemple) :

$$H_1 = 100\,\frac{E_1}{m_1}$$

$$H_2 = 100\,\frac{E_1 + \Delta E_1}{m_1 + \Delta_m} = 100\,\frac{E_2}{m_2}$$

$$H_3 = 100\,\frac{E_2 + \Delta E_2}{m_2 + \Delta_m} = 100\,\frac{E_3}{m_3}$$

. . . . . .

$$H_n = 100\,\frac{E_{n-1} + \Delta E_{n-1}}{m_{n-1} + \Delta_m} = 100\,\frac{E_n}{m_n}$$

avec : H_1, E_1, m_1, respectivement, teneurs en eau, poids d'eau et poids de matière sèche des parties aériennes au début des observations (pratiquement à l'allumage), et H_i, E_i, m_i, teneurs en eau, poids d'eau et poids de matière sèche au cours des observations. Δ_m est calculé en admettant que le taux de croissance est uniforme le jour et nul la nuit.

III. — UN EXEMPLE D'OBSERVATIONS PORTANT SUR UNE PÉRIODE DE VINGT-QUATRE HEURES

Les mesures ont porté sur un plant de tournesol (variété *INRA 6501*) et ont été effectuées dans une chambre climatisée ayant les caractéristiques suivantes :

— température : jour 22,0 ± 0,5 °C
nuit 20,0 ± 0,5 °C
— hygrométrie : jour 50,0 ± 5 p. 100
nuit 55,0 ± 5 p. 100
— éclairement : 20 000 lux

La solution nutritive utilisée est une solution complète dont la composition a été indiquée par ailleurs (Morizet et Mingeau, 1976).

1. — *Absorption hydrique*

La courbe d'absorption (fig. 4) est tracée à partir de l'enregistrement. Chaque valeur ainsi calculée est rapportée à la surface foliaire déterminée par interpolation des mesures effectuées au début et à la fin.

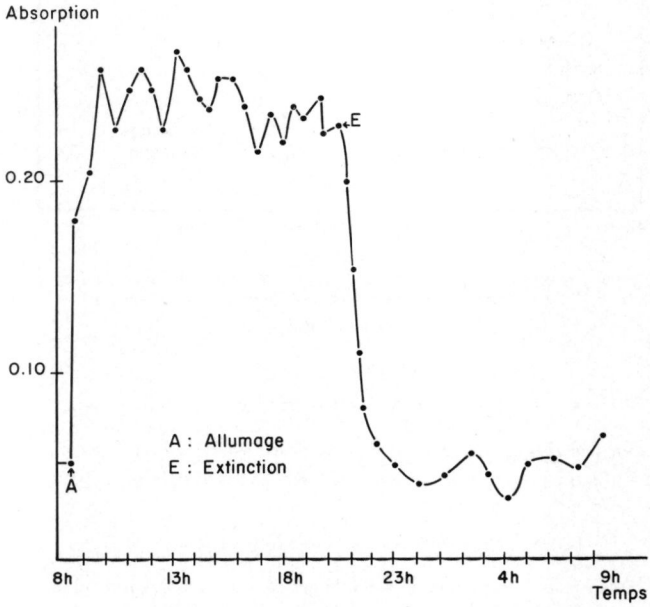


Fig. 4. — *Évolution des débits d'absorption* ($cm^3 \cdot 10\ mn^{-1} \cdot dm^{-2}$) *sur une période de 24 heures*

Aussitôt après l'allumage, le taux d'absorption s'élève rapidement pour atteindre au bout d'environ une heure, un palier qui, abstraction faite de petites oscillations, se maintient jusqu'à 16 h. Au-delà, une légère diminution se manifeste.

A l'extinction, les débits chutent brutalement pour atteindre un niveau plancher vers 24 h. En fin de nuit, une légère reprise de l'absorption se manifeste. Ce phénomène observé régulièrement sur tous les enregistrements effectués jusqu'ici, ne peut s'expliquer par une modification quelconque de l'environnement ; il relève nécessairement d'un rythme endogène de la plante.

2. — *Bilan pondéral des parties aériennes* (matière fraîche) (fig. 5)

Quand l'alimentation minérale est correcte et que le milieu racinaire est suffisamment aéré, le gain de poids de la plante se répartit d'une façon régulière sur l'ensemble des 24 h. Le gain de poids nocturne est toutefois un peu plus faible que le gain de poids diurne : 1,79 g contre 2,06 g. De plus, l'allumage se traduit par une perte faible et momentanée de poids et, à l'inverse, l'extinction s'accompagne d'un taux accéléré du gain pondéral. Ces deux accidents s'expliquent par l'inertie de réponse des débits d'absorption qui ne se règlent pas instantanément au niveau des débits transpiratoires.

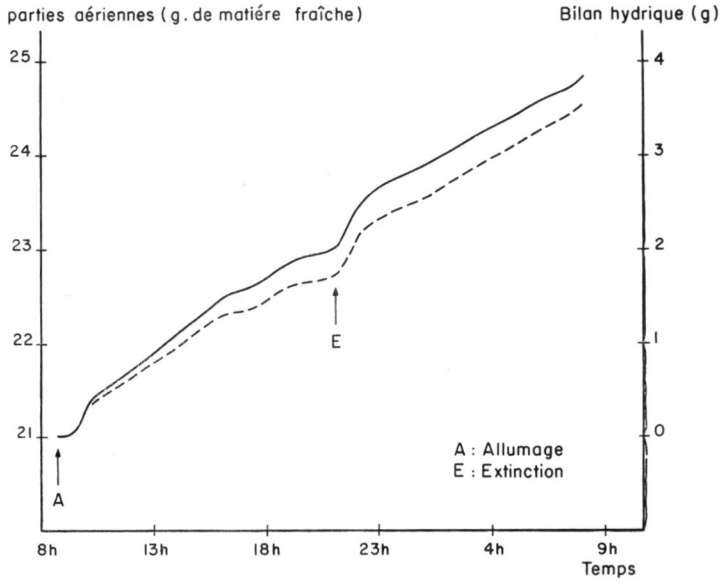


FIG. 5. — *Évolution du poids en matière fraîche* (—) *et bilan hydrique* (– – – –) *des parties aériennes sur une période de 24 heures*
A : Allumage
E : Extinction

3. — *Croissance des différents organes de la plante*

Les teneurs en eau, les poids et les gains de poids (matière fraîche : MF et matière sèche : MS) en valeur absolue et par dm^2 de surface foliaire sont indiqués au tableau 1.

4. — *Bilan hydrique des parties aériennes* (fig. 5)

La courbe obtenue est très voisine de la courbe du bilan pondéral des parties aériennes, à la remarque près que le comportement nocturne est plus proche du comportement diurne ; la différence s'explique par le gain de matière sèche affecté *a priori* à la période diurne.

TABLEAU I

Teneurs en eau et croissance des différents organes de la plante

	Teneur en eau (g d'eau contenues dans 100 g MS)	Poids (g) à 24 h d'intervalle		Gain de poids (g)		Gain de poids (g) par dm² de surface foliaire	
		MF	MS	MF	MS	MF	MS
Parties aériennes	1 170	20,98 24,83	1,65 1,96	3,85	0,31	1,14	0,092
Racines	2 350	9,33 11,31	0,38 0,46	1,98	0,08	0,59	0,024
Plante entière	1 393	30,31 36,14	2,03 2,42	5,83	0,39	1,73	0,116

5. — *Évolution des teneurs en eau des parties aériennes* (fig. 6)

La figure 6 indique une décroissance des teneurs en eau pendant le jour, résultant d'un accroissement relatif de matière sèche plus important que celui de l'eau. Au cours de la nuit, le stockage de l'eau se poursuit alors que l'élaboration de matière sèche est stoppée; il en résulte une réaugmentation des teneurs en eau qui atteignent approximativement, à la fin de la nuit, la valeur observée 24 heures plus tôt.

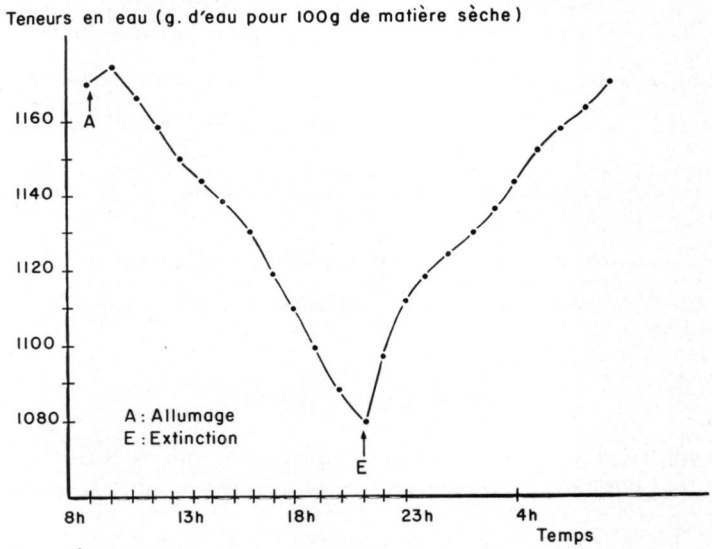


FIG. 6. — *Évolution des teneurs en eau des parties aériennes au cours d'une journée*
A : Allumage
E : Extinction

CONCLUSION

Grâce à l'aération continue du système racinaire, la seule contrainte susceptible de limiter dans le temps la durée des observations est la taille de la plante. En prenant l'exemple du tournesol, sur lequel nous avons travaillé le plus souvent, l'appareil, avec les caractéristiques que nous avons indiquées, ne peut « traiter » une plante dont le poids total en matière fraîche excède 150 g. Compte tenu qu'il n'est pas intéressant de descendre au-dessous de 30 g, notamment pour des raisons de sensibilité, la durée des observations peut s'étaler sur une quinzaine de jours pour le tournesol ; mais d'une façon générale, elle est évidemment fonction de la vitesse de croissance de la plante.

Cet appareil permet une étude assez fine, à courte échelle de temps, de l'action des facteurs de l'environnement — notamment de l'environnement racinaire — sur la dynamique de l'eau et ses relations avec la croissance de la plante. Diverses études ont déjà été entreprises qui feront l'objet de communications ultérieures. Elles ont été menées suivant un protocole qui, dans une certaine mesure permet de compenser la nécessaire limitation du nombre de répétitions : durant les trois premiers jours d'observation, l'environnement physique et chimique de la plante correspond à celui dans lequel a été réalisée la culture jusque-là ; ensuite, une ou plusieurs composantes sont modifiées suivant le traitement prévu.

L'évolution du comportement de la plante à la suite de la « mise en traitement » est comparée aux données acquises durant les trois jours qui l'ont précédée et qui servent en quelque sorte de référence. Cette façon de procéder est justifiée pour les grandeurs concernant les débits hydriques et la croissance de la plante, rapportées à une caractéristique de la taille comme la surface foliaire ; en effet, l'expérience montre que, sur une période d'au moins une dizaine de jours, de telles données gardent une valeur constante si l'environnement aérien et racinaire n'est pas modifié.

SUMMARY

DESCRIPTION OF A RECORDING POTOMETER, AN EXAMPLE OF OBSERVATIONS LIMITED TO ONE DAY

This paper gives the description of a recording potometer and presents the informations supplied by it.

The direct measurements concern the water absorption and weight variation in the aerial part of the plant.

With supplementary data given either by the plant of the potometer or by other plants grown under the same conditions, it is possible to calculate the daily growth of the aerial part and roots and to draw the daily curves of the water balance and evolution of water contents in the aerial part.

Owing to the stresses due to the device, the observations may be spread over some fifteen days.

The recording potometer allows a quite precise study, within a short period, of the action of environment factors — in particular of root environment — on water dynamics and its relations with plant growth.

ZUSAMMENFASSUNG

BESCHREIBUNG EINES SELBSTREGISTRIERENDER POTOMETERS, EIN BEISPIEL VON TAGEWEISE DURCHGEFÜHRTEN BEOBACHTUNGEN

In dieser Bericht wurdenein selbstregistrierender Potometer und die gelieferten Angaben beschrieben.

Die direkten Bestimmungen betreffen die Wasseraufnahme und die Gewichtsbilanz der oberirdischen Teilen.

Mit zusätzlichen Daten, die durch die Potometerpflanze oder andere unter denselben Bedingungen gewachsenen Pflanzen geliefert sind, kann das tägliche Wachstum der oberurdischen Teilen und der Wurzeln errechnet sein und die täglichen Kurven der Wasserbilanz und der Änderung der Wassergehalten der oberirdischen Teilen gezeichnet werden.

Mit Rücksicht auf die Beanspruchungen des Apparats mögen die Beobachtungen auf 14 Tage sich ausbreiten.

Der selbstregistrierender Potometer erlaublt eine ziemlich scharfe Analyse der Wirkung der Umweltfaktoren — insbesondere der Wurzelumgebung — auf die Wasserdynamik und deren Beziehungen mit Pflanzenwachstum auf einen kurzen Ze tabschnitt.

РЕЗЮНЕ

Описание самопишущего потометра; пример однодневных наблюдений. — Техническая заметка.

Ж. МОРИЗЕ.

В данной заметке описываются самопишущий потометр и доставляемые им сведения. С помощью этого прибора проводится прямое определение поглощения влаги воздушными частями растения и выводится их весовой баланс.

Дополнительные сведения доставленные растением потометра, или другими растениями, выращивающимися в одинаковых условиях, позволяют рассчитать ежедневный прирост воздушных частей и корней, и построить ежедневные кривые водного баланса и эволюции содержания влаги в воздушных частях растений.

Принимая во внимание ограничение вышины аппарата, наблюдения могут длиться в течении пятнадцати дней.

Самопишущий потометр позволяет проводить, в коротком масштабе времени, довольно точное изучение действия факторов окружения — и в особенности корневого окружения — на динамику влаги, и ее соотношения с ростом растения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAILLOUX M., 1966. Absorption de l'eau par les poils radiculaires. *Bull. Soc. Franç. Physiol. Vég.*, **12**, 147-156.

HARRIS D. G., 1971. Simultaneous measurements of solution absorption, transpiration, relative plant water content and growth. *Agron. J.*, **63** (6), 840-845.

KRAMER P. J., 1969. *Plant and Soil Water Relationships : A Modern Synthesis.* Ed. McGraw-Hill Book Company, 115 p.

MINGEAU M., 1969. Action de la nutrition minérale sur l'économie de l'eau dans la plante. I. Équilibre absorption-transpiration. *Ann. agron.*, **20** (3), 263-276.

MORIZET J., MINGEAU M., 1976. Influence de quelques facteurs physiques et chimiques du milieu sur l'absorption hydrique. Étude effectuée sur tomate décapitée en exsudation.
I. Facteurs nutritionnels. *Ann. agron.*, **27** (2), 183-205.
II. Facteurs physiques et interactions avec la nutrition minérale. *Ann. agron.*, **27** (3).

Ann. agron., 1976, **27** (2), 259-263.

CHRONIQUE DES LIVRES

TROISIÈME COLLOQUE EUROPÉEN ET MÉDITERRANÉEN SUR LE CONTRÔLE DE L'ALIMENTATION DES PLANTES CULTIVÉES. — Budapest, 4-7 septembre 1972. Akadémiai Kiado Ed, 1975, 2 vol., 1 014 p.

Ces deux volumes rassemblent les communications présentées au colloque de Budapest et réparties en six sections : questions générales et méthodologie ; plantes céréalières, fourragères et industrielles ; cultures maraîchères, ornementales et florales ; cultures méditerranéennes et subtropicales ; viticulture ; cultures fruitières.

En résumant les travaux présentés à la première section, le professeur COTTENIE souligne les efforts faits en vue d'une « interprétation objective » des résultats par le recours aux méthodes modernes de calcul statistique et le traitement mathématique de la somme considérable de résultats accumulés. Il est aussi amené à reconnaître que le terme de diagnostic foliaire est devenu insuffisant puisque les analyses pratiquées en vue d'un diagnostic s'étendent désormais à d'autres organes que la feuille : bourgeons, tiges, fleurs, fruits, racines et aussi sur la sève, et que certains chercheurs portent leur intérêt sur la translocation des éléments et sur les transformations métaboliques qu'ils subissent à l'intérieur du végétal, introduisant des préoccupations d'ordre biologique et physiologique dans la pose du diagnostic portant sur l'alimentation minérale des plantes. Il signale enfin l'intérêt que présentent à son avis les travaux visant à établir un rapprochement entre les teneurs en éléments des organes et un « indice de croissance ».

La deuxième section, réservée aux plantes de grande culture, domaine relativement nouveau pour l'analyse foliaire révèle le souci de standardisation des modes opératoires, notamment du prélèvement des échantillons et des recherches sur la relation entre la composition chimique du tissu foliaire, la composition du sol et le rendement des cultures. Plusieurs communications traitent de l'influence des micro-éléments sur l'alimentation des plantes en éléments majeurs, alors que d'autres étudient la répartition des éléments dans la plante, en fonction du stade phénologique du végétal. Des essais de formulation mathématique des besoins des plantes en éléments nutritifs sont également exposés ; ils semblent marqués par un caractère formel et poursuivent un objectif essentiellement utilitaire.

Les neuf communications présentées au titre de la troisième section portent sur : le diagnostic de la nutrition en N-P-K du Mélèze de Sibérie, l'incorporation et translocation du $^{14}CO_2$ dans les bulbes de tulipes, les besoins du rosier de serre en micro-éléments, le contrôle de la nutrition azotée basé sur le dosage du $N\text{-}NO_3$ dans les pétioles des plantes potagères, la toxicité des éléments-traces (Ni, Ti, B, Zn), les niveaux de référence de la composition chimique de la Tomate et de la Carotte, l'utilisation du ^{15}N dans les études de l'alimentation azotée de la tomate, la fumure en N-P-K de l'œillet américain et l'alimentation minérale du Paprika.

Les communications présentées à la quatrième section traitent de sujets variés : à côté d'études très détaillées concernant la nutrition d'une espèce végétale donnée, telle que le Cotonnier, l'Olivier, les agrumes, le Théier, sont présentées des notes originales relatives à un test à l'anhydrase carbonique dans le dépistage d'une carence en zinc chez les Citrus, à l'interaction ionique dans la nutrition du Mandarinier, ou encore à la forme d'azote la plus significative du niveau de l'alimentation azotée du Citronnier Verna (N total, N total soluble, N animé, N protéique). L'évolution de la teneur en B dans les feuilles de l'Olivier au cours de la saison et la méthode de sa détermination ont fait l'objet d'une communication détaillée.

Les exposés intéressant la Vigne et la viticulture sont les plus nombreux : vingt communications, mais une seule présente un caractère systématique, rendant compte de résultats de recherches sur la nutrition de la vigne en conditions hydroponiques. La majorité des autres traitent des relations entre la composition minérale de la feuille et les conditions d'alimentation de la Vigne. La position et la nature de l'organe de référence n'est presque plus discuté ; trois communications seulement traitent : l'une de la position de la feuille de référence, l'autre de la composition minérale des pleurs de la Vigne et la dernière de l'intérêt pour certains éléments de l'analyse pétiolaire. L'influence de l'alimentation minérale sur le métabolisme a suscité peu d'intérêt : une seule

communication porte sur les relations entre l'activité photosynthétique et l'alimentation de la Vigne en N-P-K. Le rapport entre le rendement et la teneur de la feuille en éléments nutritifs continue à préoccuper les chercheurs : quatre communications, de même que les effets des techniques culturales et notamment du désherbage chimique : trois communications. Des niveaux de référence en micro-éléments sont donnés pour B, Cu, Fe, Mn, Zn dans la 8e feuille.

Sur 16 communications présentées à la sixième section, 11 traitent de la réponse de différentes espèces fruitières à la fertilisation, deux sont consacrées aux déficiences en éléments minéraux, une au placement des engrais et deux à l'interprétation des résultats analytiques. La majorité des travaux se rapporte au pommier puis, dans l'ordre, au Pêcher, Abricotier, Poirier et Framboisier, alors que deux communications traitent des espèces forestières (*Eucalyptus Globulus*, et *Larix Europea*). Des observations intéressantes sont faites sur la possibilité qu'il y aurait de prévoir, par l'analyse foliaire, la manifestation du Bitter-Pit sur les pommes en cours de conservation. Enfin, deux communications se préoccupent des relations entre la fertilisation et les qualités organoleptiques de la pomme.

Pour conclure, on peut considérer que le colloque de Budapest a atteint l'objectif qu'il s'était fixé, en faisant le point sur l'état d'avancement des travaux intéressant le diagnostic de la nutrition des plantes et en donnant la possibilité aux tendances nouvelles de se manifester, tant dans le domaine de la méthodologie que des fondements mêmes du diagnostic de la nutrition des plantes en relation avec les divers facteurs externes et internes.

W. R.

BRUEHL (G. W.), ed. — BIOLOGY AND CONTROL OF SOIL-BORNE PLANT PATHOGENS. Third International Symposium on Factors Determining the behavior of plant pathogens in soil. Mineapolis, University of Minnesota, 5-12 september 1973. — Saint-Paul (Minn.). American Phytopathological Society, 1975, 215 p.

Cet ouvrage est le compte rendu du IIIe Symposium sur la microflore phytopathogène du sol. Il est consacré à la biologie et au contrôle de cette microflore. Le symposium s'est déroulé dans le cadre du second congrès international de Phytopathologie.

L'ouvrage donne le texte intégral de 31 communications et se termine par les résumés des communications faites au cours de deux colloques.

Les communications sont regroupées sous les chapitres suivants :

I. Introduction.
II. Dégâts causés par des champignons infestant racines et graines.
III. Relation entre l'environnement de la racine et la croissance et la survie des organismes phytopathogènes.
IV. Relation entre les résidus végétaux, les amendements et la survie et le contrôle des champignons infestant les racines.
V. Antagonisme microbien comme mécanisme de défense de l'hôte contre les microorganismes pathogènes des graines et du sol.
VI. Explication et exploitation du contrôle biologique naturel.
VII. Résistance des plantes aux champignons infestant les racines.
Colloque I : Fongistase du sol et lyse.
Colloque II : Lutte intégrée chimique et biologique contre les microorganismes phytopathogènes du sol.

J. L.

SMITH (H.). — PHYTOCHROME AND PHOTOMORPHOGENESIS. — An introduction to the control of plant development. McGraw Hill Book Co, London, 1975, 235 p.

Cet ouvrage traite de la photomorphogenèse, c'est-à-dire du contrôle exercé par la lumière dans un grand nombre de phénomènes de développement chez les plantes.

La plus grande partie du livre est consacrée au phytochrome, qui apparaît aujourd'hui comme le pigment récepteur non chlorophyllien essentiel, par lequel l'environnement lumineux influence la vie des plantes.

L'auteur, après avoir rappelé les principes de la captation de la lumière, expose les faits prouvant l'existence de plusieurs photorécepteurs chez les plantes, et les connaissances déjà accumulées sur la photochimie et la biologie de l'un d'entre eux : le phytochrome. L'auteur choisit ensuite de présenter les idées maîtresses actuelles sur les mécanismes de contrôle photobiologiques,

en traitant en profondeur, au niveau moléculaire, un nombre restreint de réponses photomorphogénétiques. Il souligne que les limites actuelles des connaissances en ce domaine, dépendent en grande partie de la finesse des techniques d'investigation disponibles : spectrophotométrie, extraction, marquage, etc.

Plan de l'ouvrage :

I. La lumière comme agent biologique.
II. Les systèmes de réponses photomorphogéniques et leurs photorécepteurs.
III. Chimie du phytochrome.
IV. Action biologique du phytochrome.
V. Photocontrôle de la germination.
VI. Photocontrôle du développement des plantules.
VII. Biochimie de la photomorphogenèse.
VIII. Conclusions et discussion.

Suivent un appendice indiquant comment réaliser différentes sources lumineuses pour les expériences de photomorphogenèse, une liste bibliographique de presque 500 références (ne comportant malheureusement pas les titres des articles) et un index des matières.

L'auteur a réussi dans son projet d'écrire un livre très pédagogique, d'initiation à la photomorphogenèse, et qui met en lumière l'intérêt de recherches regroupant les efforts de biologistes, de biochimistes et de biophysiciens.

L'ouvrage, dont la présentation est excellente (en particulier l'illustration), est susceptible d'intéresser de nombreux étudiants de niveau 3e cycle en sciences biologiques.

R. R.

PEREIRA (H. C.). — CLIMATE AND THE ORCHARD. — Commonwealth Agric. Bur., Res. Rev., n° 5, East Malling, Maidstone (Kent), 1975, 141 p.

Cette monographie éditée par le « Commonwealth Agricultural Bureaux » britannique fait le point des travaux effectués par l'équipe de la Station de Recherche d'East Malling (Kent) en matière de relations entre les facteurs du climat et la production fruitière (pommes, poires, prunes et cerises).

Depuis de nombreuses années les chercheurs d'East Malling étudient la production fruitière à la fois sous l'angle scientifique et sur le plan pratique. Dans chacune de leurs expériences, ils ont eu le souci de tenir compte des caractéristiques du climat des arbres à l'échelle du verger ou du microclimat des organes (feuilles, fleurs et fruits), ceci quelle que soit leur discipline : physiologie, pathologie, phytotechnie, etc.

Ce souci est motivé non seulement par la rigueur dans l'expérimentation « au champ » mais aussi par le fait que dans les conditions du Sud-Est de l'Angleterre le climat peut être un facteur limitant de la production.

Ainsi ont été envisagées les influences des facteurs climatiques sur le comportement de l'arbre fruitier considéré dans son ensemble et sur quelques mécanismes physiologiques fondamentaux : induction florales, photosynthèse, croissance des fruits et des rameaux, etc.

L'étude de l'interception du rayonnement par la couronne des arbres a permis d'aborder de façon solide et originale les problèmes de la taille de formation et des dispositifs de plantation des vergers.

Les travaux de l'équipe d'East Malling ont également porté sur les perturbations de la biologie des arbres fruitiers par les maladies et les parasites et les effets du climat sur le développement de ces derniers.

On retrouve l'ensemble de ces éléments dans ce livre composé de 28 articles regroupés en 6 chapitres :

1° Le climat d'East Malling et du Sud-Est de la Grande-Bretagne.
2° Influences des facteurs climatiques sur la croissance et la production (rayonnement, température et problème des gelées, eau, vent).
3° Interactions entre charge de l'arbre et croissance (photosynthèse, répartition des assimilats).
4° Influence des conditions climatiques sur l'aptitude à la conservation des fruits à pépins.
5° Effets du climat sur les maladies des arbres fruitiers (maladies d'origine fongique ou bactérienne).
6° Influence du climat sur les parasites des vergers.

Chaque article est suivi de références bibliographiques. La présentation de ce petit livre est agréable, les illustrations et graphiques très clairs. On regrettera seulement l'absence d'index des matières.

Cette mise au point est d'autant plus importante qu'il n'existe actuellement que peu de données sur la bioclimatologie des vergers.

Elle s'adresse plus particulièrement à tous ceux qui s'intéressent à la production fruitière, qu'ils soient agronomes, pathologistes, écologistes ou biologistes.

J.-C. M.

ROSENBERG (N. J.). — MICROCLIMATE : THE BIOLOGICAL ENVIRONMENT. — John Wiley and Sons, New York, 1974, 315 p.

La caractérisation du microclimat, ses variations au cours de la journée ou des saisons, ses extrêmes qui imposent des contraintes climatiques sévères aux plantes et aux animaux font l'objet de ce livre. Un accent particulier est mis sur les conditions qui peuvent modifier le microclimat de façon bénéfique et sur les interventions humaines en agriculture (moyens de lutte contre le vent, le gel, utilisation d'anti-transpirants).

La compréhension de ces phénomènes est nécessaire pour une meilleure utilisation des ressources naturelles, pour la préservation de l'environnement et pour une meilleure productivité agricole.

L'auteur, professeur à l'Université du Nebraska (Lincoln, U.S.A.), chercheur scientifique en météorologie agricole, possède une grande expérience de recherche et d'enseignement.

L'ouvrage est divisé en douze chapitres :

— le bilan radiatif ;
— flux de chaleur dans le sol et température du sol ;
— flux de chaleur sensible et température de l'air ;
— vent et transport turbulent ;
— humidité atmosphérique ;
— modification du régime de température du sol (mulching, chauffage artificiel, irrigation);
— évapotranspiration ;
— photosynthèse ;
— bilan de gaz carbonique ;
— brise-vent ;
— gelées ;
— amélioration de l'efficience de l'eau.

Une annexe donnant, par chapitre, les symboles utilisés pour les différents concepts et les unités employées (SI) ainsi qu'un index auteur et un index matière terminent l'ouvrage.

Des exemples choisis dans la littérature, mais surtout essentiellement parmi les travaux menés par l'auteur et ses collègues, illustrent le texte. La présentation globale est claire, aérée et agréable. Il s'agit là d'un manuel de base qui conviendra aux enseignants, aux élèves, mais il servira aussi utilement d'ouvrage de référence aux spécialistes de la recherche en micrométéorologie, écologie et bioclimatologie.

L. D.

STONE (J. F.). — PLANT MODIFICATION FOR MORE EFFICIENT WATER USE. — Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1975, 320 p.

Cet ouvrage constitue le premier volume d'une nouvelle collection « Developments en Agricultural and Managed-Forest Ecology » et reprend en fait, intégralement le contenu d'un numéro spécial de la revue *Agricultural Meteorology*, 1975, vol. 14, n° 1-2, publié par le même éditeur.

Le contenu de l'ouvrage, par son intérêt scientifique justifie pleinement la mise en forme d'une édition à part ; celle-ci trouvera sa place comme outil de base chez tous les nombreux spécialistes qui se penchent actuellement sur les problèmes de l'eau.

Dans les zones défavorisées où l'eau vient à manquer, c'est d'une manière réellement cruciale que se pose le problème de la disponibilité de l'eau et de son efficience, que ce soit en zone sèche ou en zone irriguée.

Le fil directeur de l'ouvrage est parfaitement précisé par le résumé extrait du chapitre de conclusion qui suit :

... « actuellement, l'état d'avancement des connaissances pouvant guider les généticiens dans leurs travaux de sélection de variétés à haut rendement et répondant aux critères physiologiques de contrôle de l'efficience de l'eau est insuffisant. Une coopération étroite sera nécessaire entre les physiologistes, les physiciens de l'environnement et les généticiens pour définir les critères de sélection relatifs à l'utilisation de l'eau et qui sont limitants pour le rendement, pour tester leur variabilité et pour introduire les critères favorables dans de nouvelles variétés. Sans un travail d'équipe accru, il est peu probable que la potentialité de sélection sur critères physiologiques soit traitée de façon suffisante sur les résultats déjà acquis pour les hauts rendements. »

C'est dans cette perspective que se tint ce colloque national américain sous l'égide de G.P.C. I (Great plains Coordinating). L'ouvrage reprend les vingt communications présentées et groupées en trois parties :

— modification génétique,
— facteurs physiologiques et facteurs de l'environnement,
— modélisation,

et suivies de la conclusion intitulée : « Modification des plantes pour une meilleure efficience de l'eau, un défi » ; c'est traduire la volonté de rencontre des chercheurs impliqués.

L'ouvrage est de bonne présentation ; son originalité de regroupement autour d'un thème agronomique aussi crucial où les efforts de recherche convergent entre spécialistes d'horizons aussi variés que les micrométéorologistes, les écophysiologistes, les biologistes et les généticiens en fait un carrefour d'idées des plus passionnants.

L. D.

POLJAKOFF-MAYBER (A.), GALE (J,), ed. — PLANTS IN SALINE ENVIRONMENTS. — Springer-Verlag, 1975, 213 p.

Le problème de la salinité devenant de plus en plus grave pour l'agriculture au fur et à mesure de l'exploitation des sols, cet ouvrage a pour but de connaître les différentes réponses des plantes à l'excès de sels et de comprendre la nature des dégâts causés aux cultures par ce phénomène.

Le premier chapitre donne un aperçu général de la question : répartition des sols salins et des plantes halophytes dans le monde et importance économique de l'utilisation éventuelle de ces sols et espèces végétales en agriculture.

Dans le second chapitre, les auteurs envisagent la gravité du problème et proposent à l'agriculteur des moyens de combattre les dommages dus à l'environnement salin.

Le troisième chapitre traite de la composition des eaux d'irrigation ; on y discute des pratiques culturales appropriées.

Enfin, dans les chapitres suivants, les auteurs étudient les réactions physiologiques des plantes au milieu salin : échanges gazeux, photosynthèse, respiration, absorption et perte d'eau, métabolisme, hormones, anatomie. Les organes excréteurs de sels particuliers aux plantes halophytes y sont décrits.

Des index par plantes et par sujets complètent cet ouvrage.

A. R.

Ann. agron., 1976, **27** (2).

CONTENTS

B. Itier, A. Perrier. — An analytical study of advection. I. — Advection with respect to relation with temperature, concentration and humidity 111

G. Gosse. — Evapotranspiration and aerodynamic parameters of a lawn in an equatorial humid country 141

F. A. Daudet, Ch. Valancogne. — Measurement of the drainage or capillary rise deep fluxes. Their importance in the water balance 165

J. Morizet, M. Mingeau. — The effect of environment on water uptake, as studied on beheaded exudating tomato. I. — The role of nutrients 183

C. Duthion. — Variations of the organic acids contents of plant roots under water excess 207

Bibliographical review :

C. Duthion, M. Mingeau. — Effects of excess moisture on plant behaviour and their consequences 221

Technical note :

J. Morizet. — Description of a recording potometer, an example of observations limited to one day 247

Books reviews 259

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos 9 : × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Sciences du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 12-1976

Dépôt légal : 4e trimestre 1976. N° d'impression : 1717

CPPAP n° 26017

annales agronomiques

Bimestriel

1976

Vol. 27 . N° 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1976, **27** (3), 265-294.

RECHERCHES SUR LA CONSTITUTION ET LA GENÈSE DES *TERRA ROXA ESTRUCTURADA* DU BRÉSIL

Introduction a une étude de la pédogenèse ferrallitique

G. PÉDRO, A. CHAUVEL (*) et A. J. MELFI

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

Section de Pédologie ORSTOM,
24, rue Bayard,
75008 Paris

Institut de Géosciences,
Université de São Paulo,
C. P. 20899, São Paulo (Brésil)

RÉSUMÉ

Cet article traite des *Terra roxa*, c'est-à-dire des sols ferrallitiques du Brésil développés aux dépens de la nappe basaltique du Parana. Il a plus précisément pour but de situer la place des *Terra roxa estructurada* (TRE) vis-à-vis, d'une part des *Terra roxa legitima* (TRL) et d'autre part des sols ferrallitiques en général.

Après avoir établi au départ que la solution du problème envisagé n'était, ni d'ordre minéralogique (type des minéraux secondaires engendrés), ni de nature texturale, les auteurs tendent à préciser en détail l'organisation des TRE (par rapport aux TRL) en couplant les données granulométriques et micromorphologiques et en essayant de les rattacher à des aspects liés à la physicochimie externe du complexe d'altération et à sa plus ou moins grande réactivité en fonction des conditions du milieu. On aboutit ainsi à montrer que la différence entre les diverses *Terra roxa* est essentiellement d'ordre *pédoplasmique*, la nature de l'organisation individualisée découlant de la désionisation continue du matériau, qui provoque en même temps la ferrisation superficielle des constituants secondaires et l'inactivation progressive du matériel argileux. Dès lors, tous les stades intermédiaires deviennent possibles entre un sol ferrallitique où la totalité de l'argile serait libre et un second dans lequel celle-ci serait entièrement masquée. Dans ces conditions, lorsque la quantité d'argile libre domine, on se trouve dans le domaine des TRE ; à l'opposé, quand c'est l'argile masquée qui est majoritaire, on a affaire plus spécialement à des sols de type TRL.

A partir de ces éléments de base, on a été conduit à élargir le débat et à montrer ainsi que toute pédogenèse ferrallitique est formée en réalité par deux sortes de phénomènes : l'un est relatif à « l'altération » des minéraux primaires avec néoformation de constituants secondaires alumineux

(*) Actuellement, Département de Science du Sol, 78000 Versailles (France).

et aluminosiliciques (gibbsite-kaolinite) [*Altéroplasmation ferrallitique*], l'autre aux transformations pédoplasmiques consécutives à l'évolution secondaire des hydrates ferrifères et du complexe d'échange [*Pédoplasmation ferrallitique*]. Différentes possibilités étant réalisables au cours de cette seconde phase, il est clair qu'un sol de nature « ferrallitique » peut présenter des *visages* différents, les plus évolués étant automatiquement ceux caractérisés par un blocage quasi total de l'argile et donc par une structure aliatique micronodulaire (oxisol typique).

INTRODUCTION

Il y a eu de tout temps au Brésil de fortes préoccupations pour les études sur les *Terra roxa*, c'est-à-dire sur les sols qui se sont développés aux dépens des roches magmatiques basiques, principalement dans la zone basaltique du Bassin du Parana. Cela tient d'abord à leur originalité propre parmi l'ensemble des sols de la zone tropicale ; cela provient en outre au fait que sur ces sols repose une grande partie du potentiel agricole du Brésil, surtout dans le Sud, et en particulier dans les Etats de São Paulo et du Parana.

Habituellement, on divise les *Terra roxa* en deux grandes unités :

1° Les *Terra roxa legitima* ou T.R. de Riberão Preto (Bramao et Simonson, 1956), qui sont des sols ferrallitiques typiques (sous classe faiblement désaturé, classification française, C.P.C.S., 1967) ; ils présentent un horizon B « Latosolique » (Commission brésilienne des sols, 1960) ou « Oxique » (U.S.D.A., 7° approximation, 1960-1967) qui est homogène, bien développé et dont le faciès typique est ce qu'on appelle la « poudre de café » ($\varnothing = 0{,}1$ mm).

2° Les *Terra roxa estructurada* ou T.R. du Parana (Bramao et Simonson, 1956) qui se rapprocheraient des « Ferrisols » de la classification tropicale belge (Sys, 1960) et des « Reddish brown lateritic soils » de la classification U.S.D.A. (1938), mais qui en réalité s'avèrent difficiles à situer.

Elles sont caractérisées principalement par le développement d'un horizon B, plus ou moins fortement différencié, à texture argileuse, relativement consistant à sec et plastique à l'état humide, et présentant enfin une structure bien individualisée, polyédrique subangulaire et de taille moyenne ($\varnothing = 5$ mm) ; d'où, la dénomination au Brésil de structure en « grains de maïs » (1). Cet horizon a été qualifié de B « textural » par la Commission des Sols (1960) et plus récemment de B « argillique » (Bennema, Jongerius et Lemos, 1970 ; Carvalho, 1970). Or, une telle assimilation n'est pas sans poser de problème sur le plan de la pédogenèse affectant ce type de sol (2).

D'un autre côté, Moniz et Jackson (1967) ont tenté d'interpréter la formation des *Terra roxa estructurada*(3) en se référant à des bases minéralogiques et en envisageant le rôle respectif du relief et de la roche-mère. Une de leurs principales conclu-

(1) En réalité, on peut distinguer 2 sous-types de TRE : dans le premier qui est le moins profond, l'horizon « grain de maïs » (B_2) passe progressivement à la roche altérée (C) ; le second sous-type est plus profond ; il est caractérisé par la présence d'un horizon (B_3) « poudre de café » entre l'horizon prismatique B_2 et l'horizon C. Au cours de ce travail, nous ne considérerons que le premier sous-type.

(2) Ce genre de problème s'est posé aussi dans d'autres pays, cf. par ex. Stoops (1968).

(3) Dorénavant, dans la suite de l'article, nous désignerons la *Terra roxa estructurada* par le sigle TRE et la *Terra roxa legitima* par la notation TRL.

sions est que la structure prismatique de l'horizon B des TRE doit être rattachée à une particularité du matériau basaltique qui sert de roche-mère au sol.

Du fait de l'existence de conceptions aussi diverses, nous avons été conduits à reprendre l'étude de ce problème. A ce sujet, nous avons eu la possibilité, au cours d'une recherche systématique entreprise depuis 1970 et portant sur les sols développés aux dépens des roches basiques dans tout le Brésil, d'examiner plusieurs dizaines de profils ; or cette étude nous a amenés à penser que les caractéristiques essentielles des horizons B_2 de TRE ne devaient être recherchées, ni dans la constitution chimique et minéralogique, ni dans la présence d'une argile d'illuviation, mais reposaient probablement sur le développement d'un certain *état d'organisation* des éléments constituant le plasma. Dans cette optique, il a donc paru plus opportun de procéder à une caractérisation *détaillée* d'un horizon bien typé de TRE, tout en effectuant chaque fois que cela est nécessaire et possible, un certain nombre de comparaisons avec d'autres horizons similaires et aussi avec un horizon B ferrallitique de TRL, qui en quelque sorte nous servira de référence.

I. — CARACTÉRISATION GÉNÉRALE DE L'ÉCHANTILLON ÉTUDIÉ (Horizon B_2 typique de TRE)

L'horizon B_2 retenu dans cette étude appartient à une TRE du second sous-type développée sur diabase, au lieu dit « Usina São Manoel » (État de São Paulo).

Sur le terrain, on peut lui assigner les caractéristiques suivantes :

Couleur : rouge foncé (2,5 YR 3/6).

Texture : appréciée *in situ*, elle est franchement argileuse (plus de 40 p. 100 d'argile). Il est à noter cependant que le caractère argileux n'est pleinement révélé qu'*après* un temps de malaxage de l'échantillon préalablement humecté.

Structure : les éléments structuraux sont de type polyédrique à cubique, de taille moyenne. Ils présentent deux catégories de faces : des faces polyédriques irrégulières et des faces planes d'aspect argileux et lisse. Celles-ci semblent correspondre à des miroirs de glissement occasionnels, résultant de pressions engendrées par les phénomènes de gonflement. Nous verrons ultérieurement, grâce à l'observation micromorphologique, que ces faces planes ne correspondent pas à des revêtements argileux.

Caractérisation chimique : la composition chimique globale indiquée dans le tableau 1, ne diffère pas de celle d'un horizon latosolique de TRL. On constate ainsi que le Ki du matériau est de 2,2 et que la teneur en fer total est, comme pour tous les sols tropicaux développés sur basalte, très élevée (23,10 p. 100). Il a été possible en outre de déterminer la teneur en Fe_2O_3 « libre », c'est-à-dire correspondant à toutes les formes qui n'appartiennent pas aux oxydes primaires de la roche ou à un minéral argileux. Le tableau 1 indique que celle-ci est voisine de 10 p. 100 pour les différentes méthodes proposées en Science du Sol, ce qui tend à montrer que l'extraction porte sensiblement dans tous les cas sur la *même* fraction d'oxydes secondaires plus ou moins cristallisés.

La capacité d'échange de base est égale à 10,70 mEq/100 g, ce qui est relativement élevé pour un sol dont l'argile est composée de kaolinite. Les cations échangeables sont constitués principalement de Ca et Mg. Quant au taux de saturation, il est important, puisqu'il atteint 88,2 p. 100 (tabl. 1). De ce point de vue, ce matériau s'oppose donc aux données habituelles des TRL : capacité d'échange plus faible et forte désaturation (cf. tabl. 9).

TABLEAU I

Composition chimique de l'Horizon B de Terra roxa estructurada
(Usina São Manoel, État de São Paulo)

Composition globale (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	Alc. ter.	Perte au feu	Total	Ki
	33,45	25,75	23,10	4,10	Tr.	13,45	99,85	2,2

Fe_2O_3 extrait par différentes méthodes (%)	« Deb »	« De Endredy »	« Segalen »	Analyse totale
	9,48	10,52	11,70	23,10

Cations échangeables* (mEq/100 g)	Ca	Mg	K	Na	Somme	$\frac{S}{T} \times 100$
	7,0	2,26	0,135	0,045	9,44	88,2

* BEC = 10,7 mEq/100 g.

Constitution minéralogique : l'analyse minéralogique met en évidence des édifices argileux de la famille de la kaolinite (métahalloysite) associées à des hydrates ferriques secondaires. A côté de ces constituants, on peut noter la présence de quelques minéraux résiduels : une petite quantité de quartz, quelques feldspaths fortement altérés et surtout des oxydes titanoferrifères magnétiques : ilménite, titanomagnétite, ulvospinelle... Au total, en associant les données chimiques et minéralogiques, on arrive à établir la constitution minéralogique globale de l'échantillon (tabl. 2).

L'examen de ce tableau fait ressortir immédiatement l'importance du « complexe d'altération », qui représente plus de 80 p. 100 de l'échantillon. Or c'est là une caractéristique qui, associée à la nature monosiallitique des argiles de néoformation, implique l'existence d'une altération de type *ferrallitique* (PÉDRO *et al.*, 1975). On retrouve naturellement ces caractères généraux dans les sols de type TRL. Notons toutefois que des différences apparaissent, qui portent essentiellement sur 2 éléments :

— d'abord, la nature plus *allitique* des TRL avec le développement de gibbsite ; ce n'est pas une règle absolue, mais cela est vrai d'une manière générale ;

— d'autre part, la nature des hydrates ferriques secondaires. A ce propos, on s'est appuyé sur la méthode mise au point par NALOVIC (1971, 1974), qui repose sur l'évaluation du paramètre $T = \frac{\Sigma M}{Fe_2O_3} \times 10$ [1] et qui montre que les oxydes sont d'autant mieux cristallisés que la valeur trouvée est faible. Comme on obtient respectivement 3,97 pour cet échantillon et 2,24 pour un B latosolique de TRL [2], on voit que les hydrates ferrifères sont toujours moins bien cristallisés dans les TRE. D'ailleurs en examinant la libération respective de Fe et de ΣM au cours des extractions successives par la méthode Segalen, NALOVIC estime que 50 p. 100 des oxydes ferriques des B_2 de TRE sont amorphes, alors que les B_2 latosoliques appartenant à des TRL ne présentent plus d'hydrates amorphes ; cela ne veut pas dire que les produits ferrifères sont bien cristallisés ; cela signifie simplement que l'organisation périodique à courte distance est dans ce cas beaucoup mieux réalisée.

TABLEAU 2

Constitution minéralogique

Éléments du matériau	Constituants	Teneur (%)
Complexe d'altération	Kaolinite	65
	Hydrates ferriques amorphes	16
Squelette	Oxydes de fer et de titane (primaires et secondaires)	15,5
	Silice résiduelle (quartz)	3,5

Caractérisation micromorphologique : l'ensemble des observations confirme la rareté du squelette qui occupe moins de 15 p. 100 du volume total, et la très large dominance du plasma. Mais elle fournit des observations supplémentaires (cliché 1).

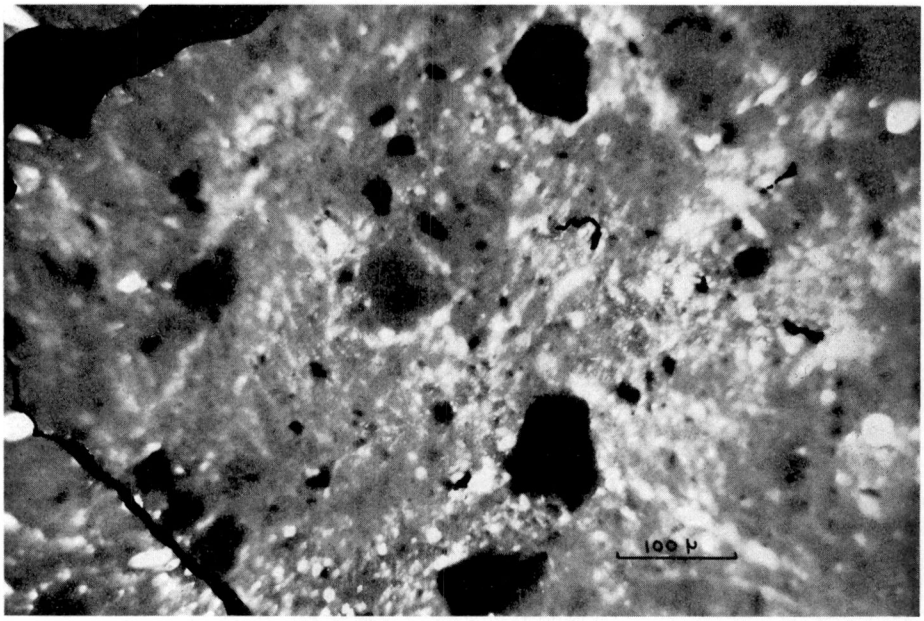
— Le plasma est constitué par un ensemble relativement homogène (et par endroit légèrement floconneux) de teinte rouge brunâtre et présentant des plages jaunâtres dont le volume n'excède pas dans cet exemple 25 p. 100 du total.

Des orientations localisées ou séparations plasmiques apparaissent en lumière polarisée : elles sont en sous-impression, sous forme de ponctuations et de stries très courtes dans le plasma rouge foncé ; en revanche, elles se développent et s'expriment beaucoup plus nettement dans les secteurs correspondant aux plages jaunes,

[1] M = Mn, Cr, V, Cu, Ni et Co (éléments traces du 1er groupe de transition).
[2] Ces valeurs différentes se retrouvent pour toutes les *Terra roxa* examinées.

tendant alors à s'orienter selon les directions privilégiées (plasma masepique). Or, ce type d'organisation est généralement attribué dans les sols à l'aptitude que présentent les cristallites d'argile à s'orienter sous l'effet de pressions et tensions engendrées lors des variations d'humidité (BREWER, 1964).

— Les vides, constitués pour une grande part par des fissures, sont plus ou moins bien représentés ; ils témoignent de l'existence de phénomènes de gonflement et de retrait réalisés au cours d'un cycle humectation-dessiccation.



CLICHÉ 1. — *Aspect micromorphologique de a Terra roxa estructurada* (lumière polarisée)

— Enfin, on peut noter l'absence ou la rareté des argilanes. Seuls quelques liserés jaunes d'argile orientée, en continuité avec les séparations plasmiques, peuvent en effet être observés en bordure des vides ; ils sont alors les indices de réorientations très localisées des constituants du plasma.

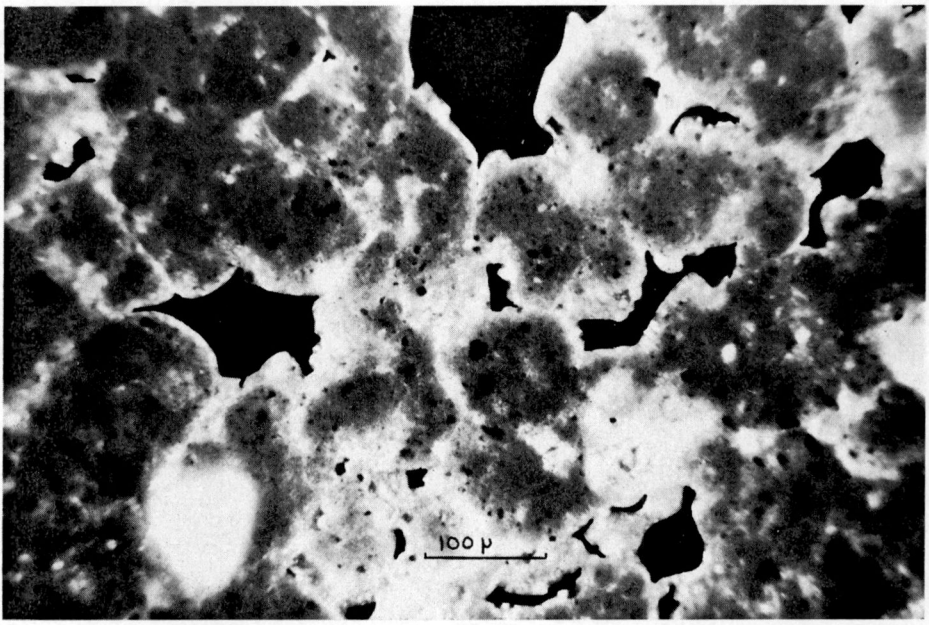
Il résulte finalement de ces divers éléments que la TRE est caractérisée par une *microstructure continue*, qui s'avère bien différente de celle des TRL. Rappelons ici que les *Terra roxa legitima* sont constituées par un assemblage de micronodules (parfois appelés « micropeds »), dont le diamètre est voisin de 100 μ et qui sont plus ou moins nettement individualisés au sein d'un fond matriciel plus clair et fréquemment soudés les uns aux autres (cliché 2).

Leur plasma est rouge vif et isotrope, tandis que celui du fond matriciel qui les enveloppe est jaune et anisotrope :

— les vides y occupent des espaces intermicronodulaires, de diamètre compris entre 5 et 200 μ ; ceux-ci sont généralement délimités par des liserés de plasma jaune anisotrope ;

— les argilanes enfin sont absents ou indissociables des liserés d'argile orientée jaune.

On a donc affaire dans ce cas à un autre type d'organisation caractérisé en même temps par la dominance d'un plasma rouge isotrope et par l'individualisation d'une structure micronodulaire poreuse.



CLICHÉ 2. — *Aspect micromorphologique de la Terra roxa legitima* (L.P.)

En conclusion, cet ensemble de considérations générales montrent que les TRE et TRL se différencient surtout par l'intermédiaire de la microstructure, de la réactivité physicochimique du complexe d'altération et en troisième lieu, par l'intermédiaire de la nature des hydrates ferriques secondaires des horizons B_2 caractéristiques.

Aussi, le but essentiel de l'étude présentée consiste dès lors à :

1) déterminer l'état d'organisation des constituants des sols, et notamment de l'horizon B_2 caractéristique des TRE ;

2) examiner les possibilités d'évolution d'une telle organisation en fonction des conditions physicochimiques et hydriques du milieu.

Ceci étant envisagé, on sera peut être à même dans la dernière partie, d'une part de préciser le déterminisme de l'acquisition de ce type de microstructure et d'autre part de le situer au sein d'une évolution pédogénétique progressive et continue.

II. — RECHERCHES SUR L'ÉTAT D'ASSOCIATION DES CONSTITUANTS DANS LES *TERRA ROXA*

1. — *Principe de la méthode*

La méthode retenue pour mettre en évidence l'état d'association des constituants dans le matériau envisagé est celle utilisée habituellement lors des études granulométriques ; elle consiste à préparer l'échantillon à l'aide d'une série de réactifs physico-

chimiques convenablement choisis, avant de procéder à une dispersion en solution aqueuse.

a) *Présentation des traitements adoptés.*

Le matériau forcé à la main à travers un tamis de 2 mm à mailles carrées, a été soumis à 11 traitements différents, préparatoires à la séparation granulométrique proprement dite. Ceux-ci mettent en œuvre les réactifs indiqués dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Nature des traitements utilisés et succession des opérations réalisées

N°	Désignation de la méthode	Destruction de la matière organique	Échange ionique	Dispersion	
				Nature du dispersant	Durée de l'agitation mécanique (h)
1	Eau distillée	—	—	—	4
2	DB H_2O_2 électro	H_2O_2 électro	KCl N/10	NH_4OH	4
3	DB H_2O_2 techn.	H_2O_2 techn.	KCl N/10	NH_4OH	4
4	Méthode internationale (HCl N/10, 1 trait.)	H_2O_2 électro	KCl N/10	NH_4OH	4
5	HCl N/10, 3 trait.	H_2O_2 électro	KCl N/10	NH_4OH	4
6	Réactif de Tamm obscurité	H_2O_2 électro	KCl N/10	NH_4OH	4
7	Réactif de Tamm lumière	H_2O_2 électro	KCl N/10	NH_4OH	4
8	Méthode Jeffries	H_2O_2 électro	KCl N/10	NH_4OH	4
9	Hexaméta-phosphate	H_2O_2 électro	KCl N/10	Hexaméta-phosphate	4
10	Pyrophosphate	H_2O_2 électro	KCl N/10	Pyrophosphate	4
11	Ultrasons	—	—	NH_4OH	4

Le premier traitement ne fait intervenir que l'eau distillée et l'agitation mécanique ; il est donc semblable à celui utilisé pour la détermination du taux d'argile « naturelle » et de l'index de floculation (pourcentage de l'argile totale qui reste floculée après agitation dans l'eau distillée).

Les traitements 2 et 3 mettent en œuvre une peroxydation de la matière organique par l'eau oxygénée, puis une saturation de l'argile par des ions K monovalents (méthode DEMOLON-BASTISSE, 1935) et enfin l'adjonction d'ammoniaque, utilisé

comme dispersant, avant de procéder à l'agitation mécanique, puis à la séparation granulométrique proprement dite. Ils ne diffèrent entre eux que par la qualité de l'eau oxygénée utilisée, produite par voie électrolytique dans le premier cas (pH = 4), par voie chimique et stabilisée à l'acide phosphorique dans le second (pH = 1,5).

Dans les traitements 4 et 5, le déplacement des cations échangeables est obtenu par lavage en milieu acide HCl N/10, laissé en contact durant une nuit et suivi de rinçages à l'eau distillée. Ce lavage est appliqué une fois dans un cas (4) (méthode internationale type) et répété trois fois dans l'autre (5). Il exerce un double effet, d'échange cationique et de solubilisation de certains éléments ferrugineux et alumineux ; naturellement, cette dernière est d'autant plus intense que le nombre de répétitions est élevé.

Les traitements 6 et 7 font intervenir un réactif complexant du fer, le réactif de Tamm, composé d'un mélange tamponné d'acide oxalique et d'oxalate d'ammonium (pH 3,6-3,7). La réaction étant photosensible, deux essais ont été effectués, l'un à l'obscurité (6), l'autre à la lumière solaire (7). Dans les deux cas, le traitement a été renouvelé une fois et suivi par des lavages avec KCl N/10.

Le traitement 8 repose sur l'utilisation de la méthode « Jeffries » : déferrification intense par réduction à l'hydrogène naissant dans un milieu tamponné constitué par un mélange d'acide oxalique-oxalate de potassium. Trois traitements successifs ont été nécessaires pour aboutir à une dispersion poussée de la fraction argileuse. Ce traitement a été suivi par une série de lavages.

Les traitements 9 et 10 font appel à des réactifs dispersants, tels l'hexamétaphosphate et le pyrophosphate de sodium, qui sont particulièrement efficaces du fait de leur pouvoir séquestrant vis-à-vis des cations floculants.

Enfin, le traitement 11 consiste en une intervention des ultrasons, suivie d'une dispersion classique à l'ammoniaque ; il a été réalisé par BONFILS (BONFILS et DUPUIS, 1969).

Pour chacun de ces traitements, 4 répétitions ont été effectuées, sauf pour le numéro 11 qui n'a été réalisé qu'en double.

b) *Résultats des études granulométriques.*

L'ensemble des données granulométriques obtenues au cours des différents traitements est regroupé dans le tableau 4.

L'examen de ce tableau conduit à faire les quelques remarques suivantes :

1° Le total des fractions, ajouté à l'humidité, est voisin de 100, sauf dans deux cas :

— celui correspondant à l'eau distillée ; cela pourrait être dû, soit à des phénomènes de floculation lente, soit à la poursuite de la mise en suspension au cours du lavage des sables ;

— celui relatif à l'application de la méthode Jeffries ; ici, il semble logique d'attribuer la fraction manquante à la dissolution de certains constituants et en particulier des hydrates ferriques ; on peut noter en effet que le taux significatif d'argile de 57 p. 100 correspond à une extraction totale de la fraction argileuse rapportée à un échantillon complètement déferrifié (72,7 p. 100).

2° Les répartitions granulométriques enregistrées sont extrêmement *variables* suivant les méthodes utilisées, puisque le taux d'argile obtenu a oscillé de 4,7 p. 100 à 75,1 p. 100.

TABLEAU 4

Constitution granulométrique

N°	Traitements	Argile (< 2 μ)	Limon fin (2-20 μ)	Limon gros (20-50 μ)	Sable fin (50-200 μ)	Sable gros (200-2 mm)	Humidité	Total
1	Eau distillée	4,7	4,9	9,4	35,9	36,2	3,6	94,7
2	DB H_2O_2 électro	20,3	20,0	27,4	25,5	2,6	3,6	99,4
3	DB H_2O_2 techn.	38,1	16,7	19,6	16,7	2,8	3,6	97,5
4	Méthode intern.	61,6	16,2	7,2	8,5	2,6	3,6	99,7
5	HCl N/10, 3 trait.	73,8	6,8	5,2	6,5	2,4	3,6	98,3
6	Tamm obscurité	75,1	8,5	5,4	6,4	2,7	3,6	101,7
7	Tamm lumière	71,1	7,6	5,8	6,6	2,4	3,6	97,1
8	Méthode Jeffries	56,7	7,2	4,2	4,1	1,2	3,5	77,0
9	Hexaméta-phosphate	72,5	10,2	6,8	8,8	2,0	2,5	102,8
10	Pyrophosphate	73,8	7,2	7,0	8,8	1,8	2,5	101,1
11	Ultrasons	73,0	10,5	8,5	6,5	1,5	—	100,0

TABLEAU 5

Reproductibilité des résultats concernant la fraction argile

N° traitements	Quantité moy. d'argile (%)	Intervalle de confiance	Écart-type	Coefficient de variation
1	4,7	± 2,45	1,55	33
2	20,3	± 1,24	0,78	4
3	38,1	± 11,54	7,25	19
4	61,6	± 13,58	8,54	14
5	73,8	± 0,64	0,40	1
6	75,1	± 1,05	0,67	1
7	71,1	± 1,12	0,70	2
8	56,7	± 0,79	0,50	1

Ceci étant établi, il paraît alors nécessaire d'examiner la question de la reproductibilité des résultats. A cet effet, pour l'ensemble des répétitions concernant les huit premiers traitements, il a été évalué, dans le cas de la fraction argile, l'intervalle de confiance tS (t étant déterminé avec un coefficient de sécurité de 95 p. 100), l'écart-type $\frac{(X_i - \overline{X})^2}{N - 1}$ et un coefficient de variation correspondant au rapport de l'écart-type à la moyenne, multiplié par 100. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 5.

Il ressort des données de ce tableau que :

— l'écart-type présente 3 valeurs *minimales*, qui se situent aux 3 niveaux suivants :

- le premier à 20,3 p. 100, correspondant au traitement 2 DB H_2O_2 électro ;
- le deuxième autour de 75 p. 100 pour les traitements 5 et 6 (HCl N/10 3 lavages et Tamm obscurité) ;
- le troisième à 56,7 p. 100 pour le traitement déferrifiant de type Jeffries ;

— les coefficients de variation atteignent, pour les traitements : 1 (eau distillée), 3 (DB H_2O_2 techn.) et 4 (méthode internationale, traitement HCl N/10 une fois) des valeurs telles que les résultats correspondants semblent dénués de toute signification.

2. — *Interprétations*

a) *Mise en évidence de pseudoparticules et du masquage de l'argile.*

D'après les données précédentes, il est certain que la teneur en argile granulométrique extraite n'a de signification statistique que dans 2 cas :

— le premier, qui correspond à 20 p. 100 d'argile, est obtenu lors du traitement (2) (DB H_2O_2 électro) ;

— le second, réalisé notamment à la suite des traitements (5) (HCl, 3 fois) et (6) (Tamm obscurité), mais aussi lors de l'application des méthodes (9) (10) et (11), met en évidence un palier vers 75 p. 100 d'argile.

On peut alors en déduire que :

— le taux d'argile maximum (75 p. 100) correspond pratiquement à la totalité des constituants secondaires du matériau, dont la dimension est « génétiquement » inférieure à 2 μ (*argile totale*) ;

— le taux d'argile correspondant à 20 p. 100 traduit la quantité maximale susceptible d'être dispersée par l'intervention d'un simple *échange ionique* (KCl) suivi d'un ajustement à pH 9,5. Il s'agit donc d'une argile aisément dispersable, qu'on peut appeler *libre* ou *mobile* ;

— la différence entre les 2 valeurs précédentes (55 p. 100) représente la fraction argile qui ne peut être extraite que par l'action, soit des ultrasons, soit de réactifs relativement acides, réducteurs ou complexants. Cette argile, qui est en quelque sorte *masquée* ou *immobilisée*, doit normalement se retrouver à l'état de particules complexes dans les fractions plus grossières. C'est effectivement ce que montre le tableau 4, où l'on peut voir que l'argile peu extractible se répartit dans les phases allant de 2 à 200 μ.

TABLEAU 6

Composition des différentes fractions caractéristiques (%)

Fractions granulométriques	Éléments dosés	Traitement (2) DB H_2O_2 électro	Traitement (6) Tamm obscurité
< 2 μ (argile)	SiO_2	29,6	32,7
	Al_2O_3	34,5	31,2
	Fe_2O_3	14,3	15,9
	FeO	0,2	0,3
	TiO_2	1,4	1,6
	Signification	Argile libre	Argile totale
> 50 μ (sable)	SiO_2	30,7	32,8
	Al_2O_3	28,5	14,4
	Fe_2O_3	19,3	20,2
	FeO	3,0	10,8
	TiO_2	8,3	22,8
	Signification	Particules complexes	Particules monominérales primaires

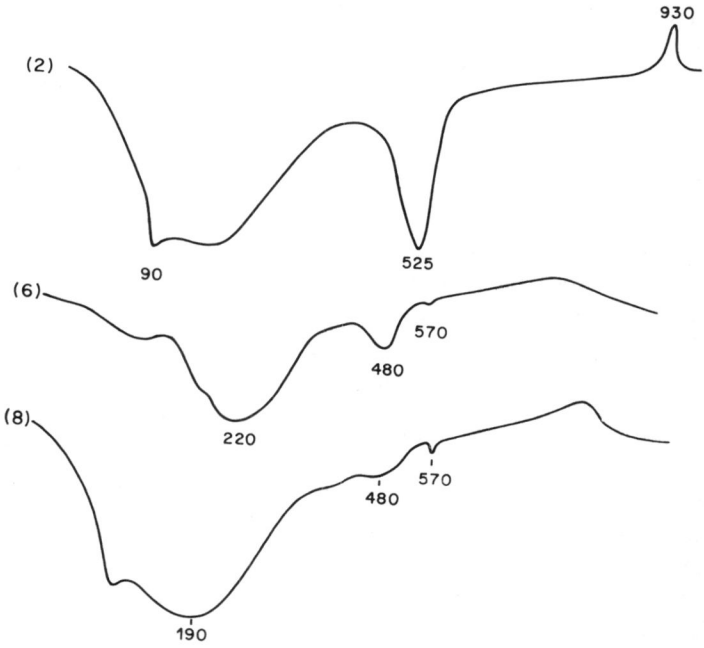
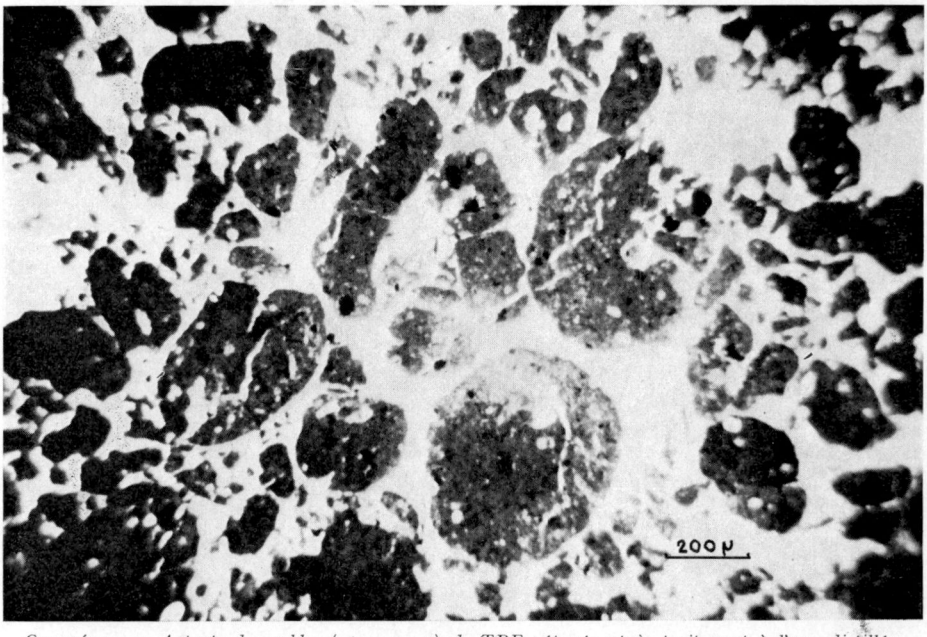


FIG. 1. — *Comparaison des courbes d'analyse thermique différentielle des fractions sableuses en provenance de différents prétraitements*

L'étude chimique des sables (tabl. 6) couplée avec une analyse minéralogique (diffraction des rayons X et analyse thermique différentielle, figure 1) appuie cette façon de voir. En effet, le traitement type (2) aboutit à des sables contenant de la kaolinite en quantités notables, tandis que les méthodes type (6) ne font apparaître que des oxydes titanoferrifères primaires associés à du quartz.

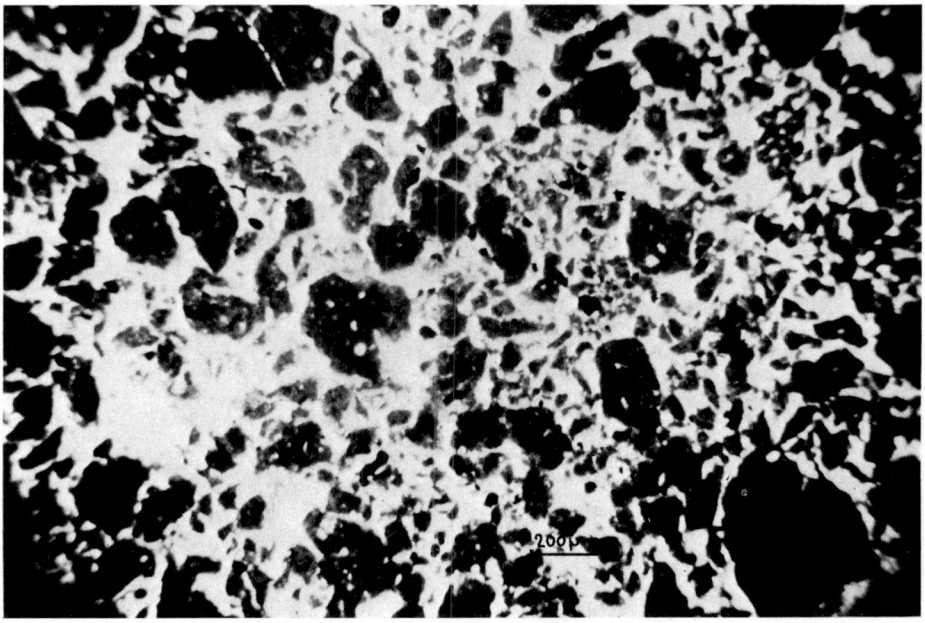
Enfin, les données microscopiques confirment la nature essentiellement *plasmique* des fractions de la taille des sables recueillis au cours du traitement (2) (cliché 4). A titre de comparaison, sont présentés les agrégats séparés à l'eau distillée (cliché 3) et les éléments du squelette extraits lors du traitement Tamm (6) (cliché 5). Si l'on rapproche ces derniers éléments de ceux rapportés précédemment lors de l'observation micromorphologique de l'échantillon brut, on est conduit logiquement à attribuer l'existence du plasma rouge et dense à la présence d'argile immobilisée, tandis que les 25 p. 100 (en volume) du plasma jaunâtre et peu dense correspondraient grosso modo à de l'argile libre, c'est-à-dire aisément dispersable.



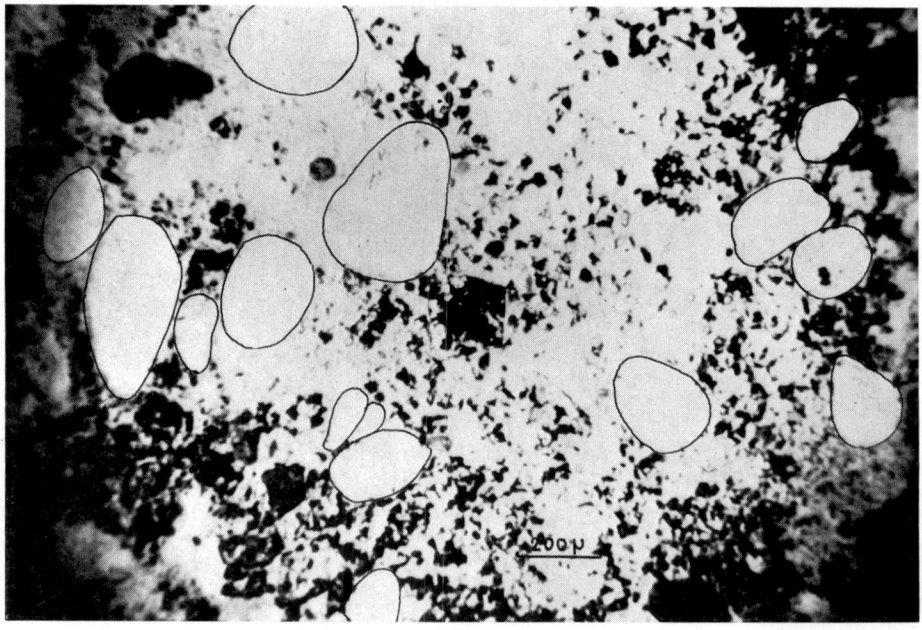
CLICHÉ 3. — *Aspects des sables* (ø > 50 μ) *de TRE séparés après traitement à l'eau distillée. Fragments de fond matriciel constitués de plasma* (largement dominant) *et de grains de squelette dispersés*

En définitive, l'emploi de méthodes granulométriques appropriées a conduit à démontrer l'existence au sein de l'horizon B_2 de TRE de particules grossières et relativement stables à constitution essentiellement plasmique ; celles-ci matérialisent donc un « état d'association » de certaines particules argileuses, qui semble effectivevement constituer une caractéristique du matériau étudié.

Arrivés à ce stade, les problèmes qui restent posés sont ceux qui ont trait d'une part à la stabilité relative de ces « pseudoparticules » et d'autre part, à la nature éventuellement différente des argiles libre et masquée.



CLICHÉ 4. — *Aspects des sables (ø > 50 μ) de TRE séparés après traitement « DB H_2O_2 électro » « Pseudoparticules » incluant des grains de squelette*



CLICHÉ 5. — *Aspects des sables (ø > 50 μ) de TRE résultant d'un traitement Tamm. « Sable vrai » résultant de la concentration de tous les minéraux primaires constituant le squelette*

b) *Extraction du fer et son rôle dans la récupération des différents types de constituants plasmiques.*

Il est évident qu'en dehors des traitements à l'eau ou au KCl et de la méthode aux ultrasons, toutes les autres interventions reposent sur l'action d'agents acides et/ou complexants. On pouvait donc se demander s'il existait une relation entre la quantité d'argile récupérée et la solubilisation d'un certain nombre d'éléments tels Fe, Al, Mn, Ti et SiO_2. Leur dosage dans les solutions d'extraction a donc été réalisé pour 5 des traitements utilisés ; les résultats obtenus sont reproduits dans le tableau 7.

TABLEAU 7

Relations entre la quantité d'argile récupérée et le taux d'extraction de divers éléments (%)

Pré-traitements	Fe_2O_3	Al_2O_3	MnO	SiO_2	TiO_2	Argile récupérée (%)
2 (DB H_2O_2 électro)	0	0	0,03	0,02	0	20,3
4 (HCl, 1 traitement)	0,03	0,20	0,03	0,11	0	26,7
5 (HCl, 3 traitements)	0,08	0,27	0,03	0,14	0	56,9
6 (Tamm obscurité)	0,20	0,22	0,04	0	0	74,9
8 (Jeffries)	13,20	—	—	—	—	72,9 (*)

(*) ramené à 100 de matériau.

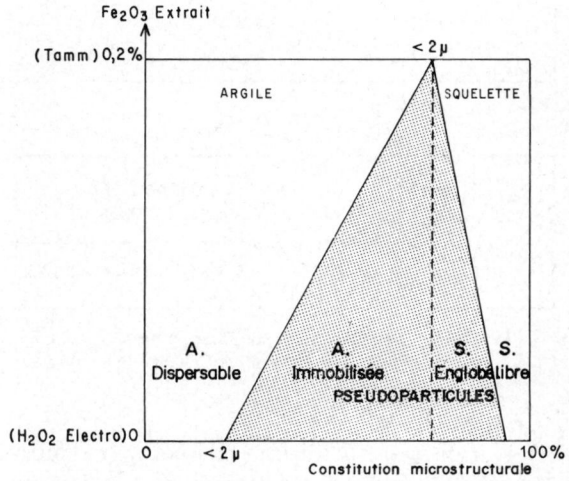


FIG. 2. — *Action du traitement Tamm sur la dissociation des pseudoparticules et le démasquage de l'argile*

A l'examen de ce tableau, il apparaît que la plupart des éléments concernés semblent ne jouer aucun rôle ; ceci résulte du fait, soit que leur extraction est nulle pour tous les traitements (cas TiO_2), soit qu'elle est complètement anarchique (cas

SiO_2), soit enfin qu'elle est constante (cas Al_2O_3 et MnO). En revanche, le fer semble intervenir ; il ne le fait pas toutefois d'une manière massive, puisqu'une extraction de Fe_2O_3 voisine de 0,2 p. 100 ou une extraction complète (13,2 p. 100) conduisent pratiquement au même résultat. Au total, il semble bien que seule une infime fraction de fer associée aux silicates argileux (0,2 p. 100) soit responsable de l'immobilisation et du masquage d'une quantité d'argile plus ou moins importante ; c'est cet état de chose que la figure 2 a pour but de présenter d'une manière très schématique.

Un résultat de ce type ne doit pas au demeurant nous surprendre dans la mesure où nous savons que la composition de l'argile libre est peu différente de celle de l'argile totale et que la teneur en fer de la première n'est que légèrement inférieure à celle de la seconde : 14,3 contre 15,9 p. 100 (cf. tabl. 6). D'ailleurs l'étude microchimique réalisée à la sonde de Castaing sur les plages jaunâtres et brun-rouge d'un échantillon global confirme tout à fait ce résultat, puisque l'on a trouvé respectivement 11,8 p. 100 et 13,5 p. 100 de Fe_2O_3.

c) *Conclusions.*

L'ensemble des informations recueillies sur l'échantillon B_2 de TRE de São Manoel, grâce à l'utilisation de l'analyse granulométrique et de l'observation micromorphologique, peut être synthétisé sous la forme d'un schéma (fig. 3) qui fait nettement ressortir que les pseudoparticules sont constituées fondamentalement par l'association de cristallites argileux masqués.

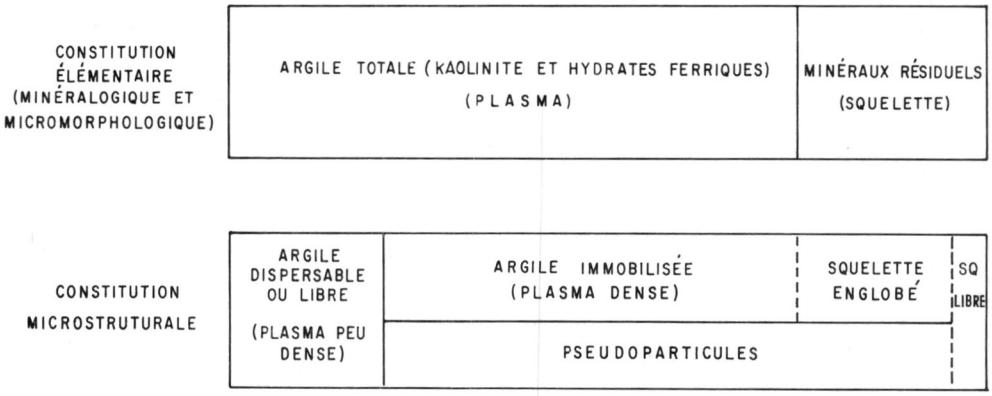


FIG. 3. — *Représentation schématique de la constitution granulométrique et micromorphologique de l'échantillon de TRE* (São Manoel)

Une telle représentation reste d'ailleurs valable pour d'autres échantillons de TRE auxquels la méthode d'investigation a été appliquée. Mais, la quantité réelle de pseudoparticules peut être en revanche essentiellement variable : elle est ainsi faible dans un horizon B à structure fragmentaire (TRE), alors qu'elle s'élève au fur et à mesure qu'une structure « aliatique » se développe.

Quant aux TRL caractérisées par un horizon B_2 de type « poudre de café », elles sont en pratique dépourvues d'argile libre et constituées presque exclusivement de pseudoparticules.

III. — RECHERCHES SUR LE COMPORTEMENT ET LA RÉACTIVITÉ DES *TERRA ROXA*

Nous venons de faire état de l'éventuelle influence d'une très faible quantité de fer extraite par le réactif de Tamm (~ 0,5 p. 100) sur l'immobilisation relative d'une certaine fraction de la kaolinite présente dans l'échantillon de TRE. Pour tenter d'aller plus avant dans la compréhension de ce mécanisme de « blocage » de l'argile, nous avons, suivant les conceptions exposées récemment (CHAUVEL, PÉDRO et TESSIER, 1976), entrepris une étude sur la réactivité comparée, soit des 2 sortes d'argiles mises en évidence dans un même horizon, soit des différents matériaux envisagés, *avant* et *après* les avoir soumis à l'action du traitement Tamm [1]. Nous traiterons donc successivement les 2 points suivants :

— évaluation de l'aptitude au gonflement des divers échantillons,

— estimation de la charge des particules argileuses en relation avec leur réactivité superficielle.

1. — *Évaluation de l'aptitude au gonflement*

La plupart des matériaux argileux possèdent la propriété de changer plus ou moins de volume lorsqu'ils sont mis en présence d'eau, ce qui résulte essentiellement de l'introduction d'un film d'eau à la surface des particules. Nous savons en effet (TESSIER, 1975 ; TESSIER et PÉDRO, 1976) qu'il s'agit d'un phénomène exclusivement *interparticulaire*, qui ne dépend donc que de la surface *externe* des particules, de leur *charge superficielle* et de la *nature* des ions compensateurs présents dans la double couche.

Or, ce gonflement est un facteur déterminant dans la formation de la structure des matériaux argileux, étant donné qu'il est à l'origine de tensions qui provoquent, soit la réorientation de certains constituants, soit l'individualisation de fissures délimitant certains agrégats.

Pour apprécier quantitativement l'aptitude au gonflement, il suffit de déterminer le volume spécifique apparent à l'état sec et à l'état humide d'agrégats de dimension comprise entre 2 et 3 mm (MONNIER *et al.*, 1973). On appelle ainsi « gonflement potentiel » avec MONNIER, le paramètre : $Gp = \frac{Vah - Vas}{Vas} \times 100$.

Cette méthode a été appliquée à 3 échantillons contenant la *même* quantité *totale* de kaolinite : un horizon B_2 de TRE (São Manoel), un horizon B latosolique de TRL et un échantillon *artificiel* confectionné à partir de la kaolinite de Provins rendue Ca [2]. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 8.

[1] Le traitement Tamm proposé en 1922 est un traitement connu pour provoquer l'extraction des formes dites *actives* du fer (SCHWERTMANN, 1964).

[2] Sur les caractéristiques précises de cette kaolinite pure de gisement, se reporter au travail de D. TESSIER. *Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles*, Thèse C.N.A.M., 1975.

TABLEAU 8

Évaluation du gonflement potentiel

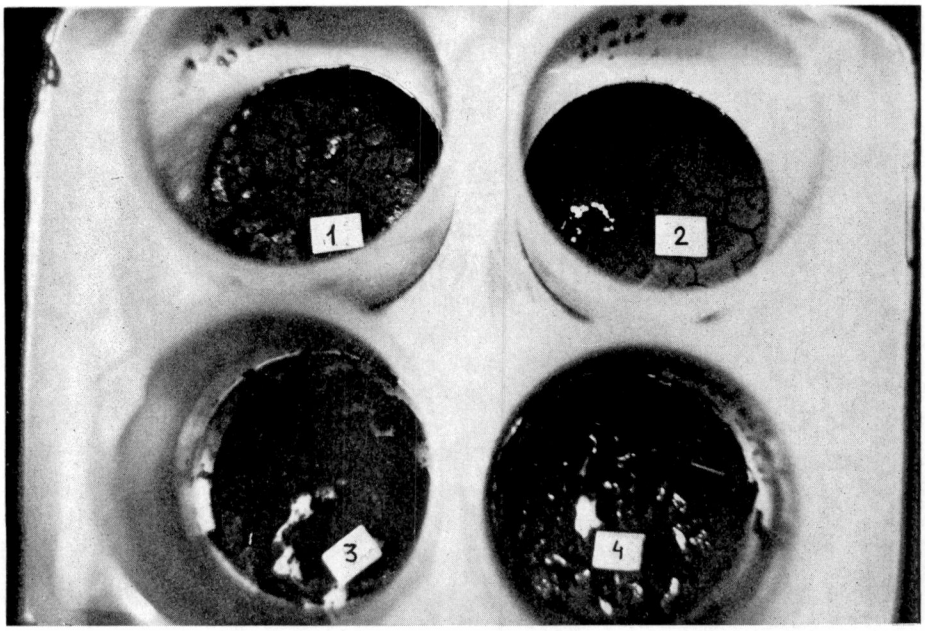
Échantillons testés	d*s*	d*h*	Gp
TRE	1,60	1,44	11,3
TRL	1,35	1,28	5,2
Matériau kaolinique artificiel	1,56	1,35	16,0

En examinant ce tableau, on remarque que :

— le matériau kaolinique de référence, constitué par la juxtaposition de particules *indépendantes* (absence de pseudoparticules) présente un gonflement important, puisqu'il atteint 16 p. 100 ;

— l'horizon B latosolique (TRL), essentiellement pseudoparticulaire et à forte teneur en argile immobilisée, gonfle peu (5,2 p. 100) ;

— enfin, l'échantillon de TRE est caractérisé par un gonflement relativement important (11,3 p. 100), mais qui n'atteint pas celui de l'échantillon de référence ; cela traduit simplement l'existence d'un masquage de certaines particules argileuses.



CLICHÉ 6. — *Comparaison des aspects de la Terra roxa estructurada* (n° 1 et n° 3) *et de la Terra roxa legitima* (n° 2 et n° 4) *rendues Na, avant traitement Tamm* (n° 1 et n° 2) *et après traitement Tamm* (n° 3 et n° 4)

Notons toutefois que cette réactivité suffit à expliquer la formation de miroirs de glissement occasionnels par le simple jeu des alternances de dessiccation et d'humectation.

La relation entre l'aptitude au retrait et au gonflement d'un échantillon et son taux d'argile non masquée peut être mise en évidence, qualitativement mais de façon spectaculaire, en procédant de la façon suivante :

— d'un côté, on traite l'échantillon par NaCl pour le rendre sodique [1], on le lave, on le dépose au fond d'un bécher et on le laisse se dessécher librement à l'air ;

— d'un autre côté, on traite l'échantillon par le réactif de Tamm, puis on lave et on procède de la même manière que précédemment.

Une telle manipulation a été réalisée sur les horizons de TRE et TRL et a donné les résultats présentés dans le cliché 6.

Sous forme Na, on constate que l'échantillon de TRL reste dans l'ensemble sableux, donc pseudoparticulaire, ce qui confirme la non réactivité de la majeure partie de l'argile.

A l'opposé, l'échantillon de TRE fait apparaître quelques fissures de 1 à 2 mm de largeur, qui dénotent l'importance du retrait provoqué lors de la dessiccation. Ces fissures délimitent des sortes de plaquettes, dont l'aspect brillant exprime le caractère typiquement argileux des matériaux.

Enfin, les échantillons de TRE et TRL soumis au traitement Tamm réagissent de la *même* manière. Le retrait enregistré est très important, en sorte que l'apparition de fissures accompagnées de déformations se manifeste sur *toute* la pellicule. Là encore, l'aspect brillant des plaquettes révèle bien la nature argileuse du matériau.

En conclusion, les données précédentes mettent parfaitement en évidence la relation *inverse* qui existe entre l'aptitude au gonflement et le degré d'immobilisation de l'argile : ainsi, les TRE et TRL réagissent de la *même* manière lorsque artificiellement on provoque la libération totale de leurs particules argileuses. Dans ces conditions, *ce qui permet de les distinguer, ce n'est pas en définitive la teneur en argile, ni sa nature, c'est bien la quantité d'argile masquée présente dans le matériau, c'est-à-dire la teneur en pseudoparticules.* Arrivés à ce stade, il nous reste maintenant à étudier les caractéristiques des surfaces dans le cas des 2 sortes d'argiles libres et masquées.

2. — *Estimation de la charge des particules argileuses. Relation avec leur réactivité*

Les caractéristiques principales des surfaces argileuses sont liées à leur charge et à la nature des ions servant à sa neutralisation. Mais, comme il s'agit de tester la réactivité des argiles *dans leur état naturel*, il n'était pas question de les extraire, tout traitement pouvant provoquer une modification de l'état de l'interface des particules. C'est la raison pour laquelle nous avons opéré sur les matériaux *bruts* [2].

L'estimation du nombre de charges présentes à la surface des particules a été réalisée en mesurant la capacité d'échange de cations. Elle a donné pour les 2 échantillons de TRE et TRL les résultats suivants (tabl. 9).

[1] Avec le sodium, les phénomènes de gonflement présentent leur amplitude maxima.

[2] Rappelons que la quantité de minéraux secondaires représente en moyenne 80 p. 100 des échantillons.

TABLEAU 9

Capacité d'échange (mEq/100 g) *et nature du complexe d'échange*

Échantillons	BEC	Cations compensateurs				Taux de saturation
		Ca	Mg	K	Na	
TRE	10,7	7,0	2,26	0,13	0,05	88,2
TRL	6,1	0,1	0,06	0,02	0,02	3,2

On remarque immédiatement que :

— pour une teneur en kaolinite comparable, l'échantillon TRE présente une capacité d'échange nettement plus élevée (+ 75 p. 100) que le matériau TRL ;

— la faible capacité d'échange des échantillons TRL s'accompagne d'une très forte désaturation, c'est-à-dire de l'absence de cations basiques au sein de la double couche.

TABLEAU 10

Évolution de la capacité d'échange de TRE

Échantillons	BEC (mEq/100 g)
Matériau brut	10,70 ± 0,04
Matériau rendu Na, puis lavé (référence)	10,18 ± 0,09
Matériau traité Tamm, puis rendu Na et lavé	12,67 ± 0,16
Gain de BEC	+ 24 p. 100

A partir de là, il a semblé intéressant d'étudier la variation de la BEC d'un échantillon après avoir provoqué une libération totale de l'argile sous l'action du traitement Tamm. C'est ce qui a été réalisé sur le matériau TRE et a abouti aux données du tableau 10 ; il en découle que :

— la capacité d'échange est d'autant plus élevée, pour une même teneur en argile totale, que le matériau contient plus d'argile libre ;

— une grande proportion d'argile masquée semble aller de pair avec une très faible teneur en cations basiques de compensation ;

— le traitement Tamm, qui extrait environ 0,2 p. 100 du fer, augmente la capacité d'échange en même temps que la quantité d'argile libre. Notons toutefois que les accroissements ne se font pas dans les mêmes rapports, ce qui signifie entre autres que l'argile immobilisée reste presque totalement *accessible* à l'action des fluides.

Ces divers résultats nous amènent alors à concevoir les choses de la manière suivante :

1° Dans les argiles masquées, la compensation des charges se fait partiellement par des ions qui, du fait de leur valence et de leurs caractéristiques, ne sont pas échangeables dans les conditions normales ; ce seraient très probablement ici des *ions ferriques plus ou moins hydroxylés* (cf. CHAUVEL *et al.*, 1976). Ainsi, le traitement Tamm en extrayant ces ions ferrifères superficiels, augmenterait la charge de l'argile, donc sa réactivité vis-à-vis des phénomènes d'échange, d'hydratation et de gonflement.

2° La très forte désaturation constatée dans le cas des échantillons à argile masquée, qui correspond en fait à une absence de cations basiques compétitifs, implique nécessairement une compensation par des cations plus acides [1] qui se fixent alors énergiquement à la surface des particules et tendent à diminuer la réactivité de l'argile, donc en quelque sorte à la « masquer ».

IV. — SYNTHÈSE DES DONNÉES : CONSIDÉRATIONS SUR LE DÉVELOPPEMENT DU PROCESSUS DE FERRALLITISATION

1. — *Genèse et évolution des* Terra roxa

L'étude systématique d'un grand nombre de *Terra roxa*, aussi bien du point de vue minéralogique, physicochimique que micromorphologique, jointe aux recherches de détail présentées au cours de ce travail, nous conduit à penser que tous les stades d'évolution peuvent exister entre un échantillon virtuel où la totalité de l'argile serait libre et un second dans lequel celle-ci serait entièrement masquée sous forme pseudoparticulaire. Suivant cette conception, les stades les plus courants type TRE (1° sous-type) et TRL seraient en fait des simples stades *intermédiaires*.

La figure 4 matérialise d'une manière évidemment schématique les possibilités d'évolution *continue* relative aux constituants secondaires du plasma, aussi bien argileux que ferrifères, telles qu'elles découlent des données présentées ici.

Si l'on adopte un tel canevas, il devient aisé de retracer l'évolution qui se manifeste *au cours du temps* d'un point de vue aussi bien géochimique que micromorphologique.

a) *Évolution géochimique.*

Au départ le basalte, qui est une roche basique riche en fer et en éléments traces de transition, subit une altération monosiallitique, puis au sein du B, une pédoplasmation primaire qui le transforme en un matériau argileux constitué par de la kaolinite saturée par des cations basiques associée à des oxydes de fer amorphes et impurs, car renfermant des éléments traces (NALOVIC, 1974). Toute l'argile engendrée reste alors libre, en sorte que le matériau qui présente un aspect massif (Type Rotlehm de KUBIENA, 1950) a tendance à gonfler lors des périodes d'humectation.

[1] D'après les mesures effectuées, ces cations ne sont pas ici aluminiques et ne peuvent être que ferrifères (tabl. 7).

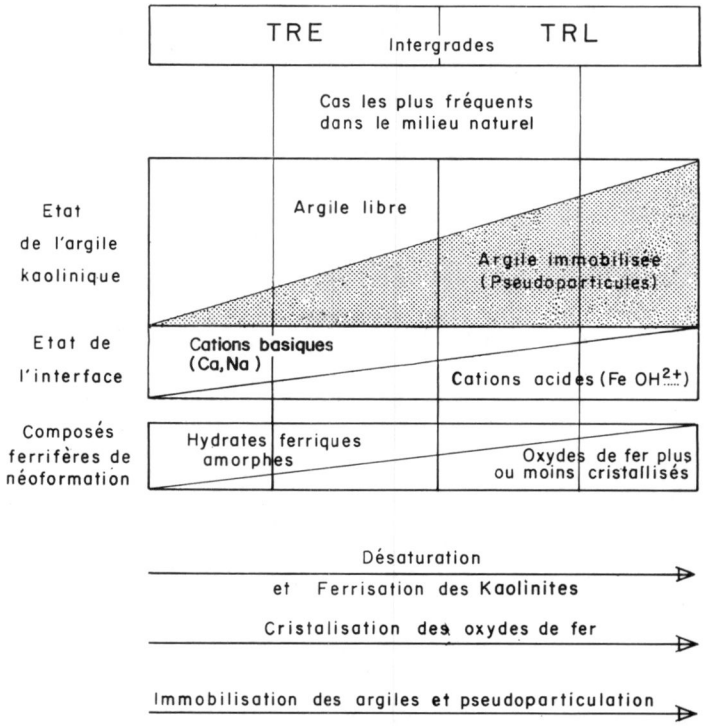


FIG. 4. — *Variation du degré d'immobilisation de l'argile* (formation de pseudoparticules), *de ses caractéristiques physicochimiques de surface et de l'état des constituants ferrifères en fonction du stade d'évolution des Terra roxa.*

A partir de là, le drainage intense qui continue à affecter les sols en climats chauds et humides, entraîne une lixiviation progressive des éléments les plus labiles, c'est-à-dire des cations basiques présents dans la double couche des argiles et des ions de transition associés aux oxydes de fer (1). Il se produit donc une désaturation du complexe absorbant, en même temps que le départ des ions de transition est à l'origine d'une réorganisation cristalline des composés ferrifères. Or, c'est cette dernière qui, en libérant d'une manière éphémère des ions ferriques plus ou moins hydroxylés, est responsable de la « ferrisation » superficielle des kaolinites et simultanément de la cristallisation d'oxydes de fer, tel l'hématite. A la fin de l'évolution, on aboutirait ainsi à un milieu fortement désaturé avec mise en place d'un nouveau pédoplasma constitué d'argiles ferrisées et d'oxydes de fer, associés sous la forme de pseudoparticules particulièrement inactives (Type Roterde de KUBIENA, 1950).

En définitive, il résulte de cette analyse que l'évolution géochimique secondaire s'accompagne nécessairement d'une réorganisation structurale ; c'est cette réorganisation qui aboutit à l'individualisation d'un nouveau type de pédoplasma, que nous allons examiner maintenant.

(1) Dans certains cas, il peut même y avoir désilicification partielle de la kaolinite et individualisation de gibbsite (allitisation). Cette évolution conduisant à des minéraux encore moins chargés renforce l'inactivation du matériau.

b) *Conséquence micromorphologique.*

Les transformations micromorphologiques enregistrées au cours de l'évolution sont schématisées dans la figure 5.

Au départ, on se trouve dans l'horizon B de TRE en présence d'un plasma formant une masse continue où ne se distinguent que de rares séparations plasmiques (1° stade).

Par le jeu des phénomènes de gonflement et de retrait, qui caractérisent un tel matériau kaolinique saturé (argile libre), les particules d'argiles s'orientent localement selon les directions des pressions et tensions exercées au sein du matériau créant ainsi des séparations plasmiques, puis des miroirs de glissement occasionnels à partir desquels se développe un réseau de fissures, qui lui-même permet la circulation de l'eau et de l'air (2° stade).

Cette circulation entraîne une élimination progressive des cations basiques externes et en même temps des éléments de transition présents dans les oxydes de fer. Il en résulte une évolution des formes du fer à proximité des fissures, ce qui conduit à une opacité beaucoup plus grande de la périphérie (individualisation d'un cortex) et à la délimitation d'entités structurales plus stables qui correspondent au faciès « grains de maïs » (3° stade).

Puis, l'évolution se poursuivant au sein des cortex, la microstructure se transforme ; il apparaît ainsi progressivement des sortes de vides contournés, qui tendent à isoler le cortex du reste du matériau et à former des « micronodules », dont la dispersabilité et le gonflement deviennent très faibles (pseudoparticules types). C'est le 4e stade (cf. à ce sujet LARUELLE, 1956 et BENNEMA *et al.*, 1970).

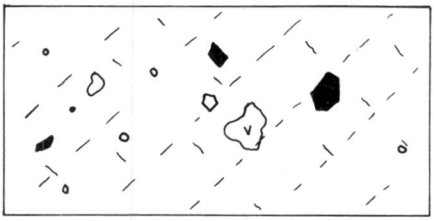
Enfin, la transformation gagne tout le matériau, en sorte que l'assemblage de « micronodules » devient la caractéristique microstructurale majeure de l'échantillon. On aboutit ainsi à une structure aliatique (CHATELIN et MARTIN, 1972) dite en « poudre de café » (Type Roterde), si spécifique des *Terra roxa legitima* les plus évoluées.

En conclusion, nous venons de montrer une possibilité d'évolution *continue* d'un pédoplasma ferrokaolinique donné sous la seule influence du temps (durée de lixiviation), et qui se traduit essentiellement par une *inactivation progressive de l'argile consécutive à une ferrisation superficielle.* Il s'agit donc d'une évolution *normale*, qui s'inscrit dans un « phyllum » bien déterminé et qui en quelque sorte, caractérise le processus de « ferrallitisation » au sens strict du terme.

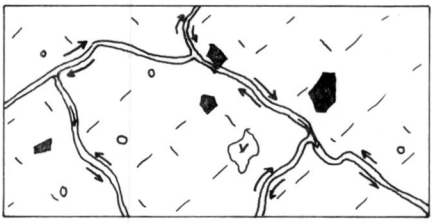
Ceci ne veut pas dire que cette évolution soit irréversible. Il a été montré dans un autre travail (CHAUVEL, 1976) que le phénomène inverse peut se produire, c'est-à-dire que la déferrisation superficielle d'un matériau ferrallitique conduise à la réactivation de la kaolinite et ainsi au développement d'une structure massive type « horizon de comportement » (CHAUVEL et FAUCK, 1969). Il s'agit dans ce cas d'une évolution qu'on peut dénominer *régressive* et qui constitue un des premiers stades d'une sorte de « déferrallitisation » des sols [1].

[1] Sans entrer dans les détails, il est tout à fait possible que l'évolution régressive marque certaines TRL du Brésil et aboutisse dans un premier stade à l'individualisation de TRE du deuxième type, donc présentant un B_2 « grain de maïs » au-dessus d'un B_3 « poudre de café ». Nous envisagerons ce second aspect de la question dans un travail ultérieur.

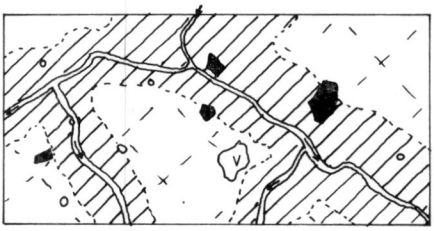
1er Stade



2e Stade



3e Stade



4e Stade

5e Stade

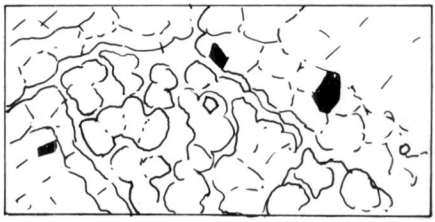


FIG. 5. — *Transformation micromorphologique des Terra roxa au fur et à mesure de leur évolution*

2. — *Caractérisation de la pédogenèse ferrallitique*

a) *Définition de l'altération ferrallitique* (altéroplasmation).

Depuis les travaux de BAUER (1898) et de HARRASSOWITZ (1926), la « latéritisation » des régions tropicales a été reliée tout d'abord à une altération de type *allitique* due à une désilicification totale de la roche, avec individualisation d'hydroxydes d'aluminium (gibbsite) dans le profil : c'est ce que ROBINSON (1928) a appelé la *Ferrallitisation*. Par la suite, du fait que de nombreux sols latéritiques contiennent exclusivement de la kaolinite, la définition a été élargie et étendue à tous les sols présentant un ki = SiO_2/Al_2O_3, résultant de l'attaque triacide, *inférieur ou égal* à 2 (cf. notamment HARRISSON, 1934 ; AUBERT, 1954 ; CHATELIN, 1970). Dans ces conditions, le processus mis en jeu au cours de la latéritisation correspond à une désalcalinisation pratiquement totale des minéraux en voie d'altération qui s'accompagne d'une néoformation, soit d'hydroxydes d'aluminium (allitisation), soit de kaolinite (monosiallitisation), soit des 2 à la fois (ferrallitisation au sens large) (cf. PÉDRO, 1973).

Ultérieurement, la découverte de gibbsite associée éventuellement à de la kaolinite et à d'autres minéraux argileux a été réalisée dans un certain nombre de sols et niveaux d'altération ne présentant pas le caractère ferrallitique habituel. Comme de tels profils contiennent en même temps de nombreux minéraux non altérés (réserve minérale primaire), on a été amené à faire intervenir, dans la définition de la latéritisation, la notion de « degré d'altération » (PÉDRO, DELMAS et SEDDOH, 1975).

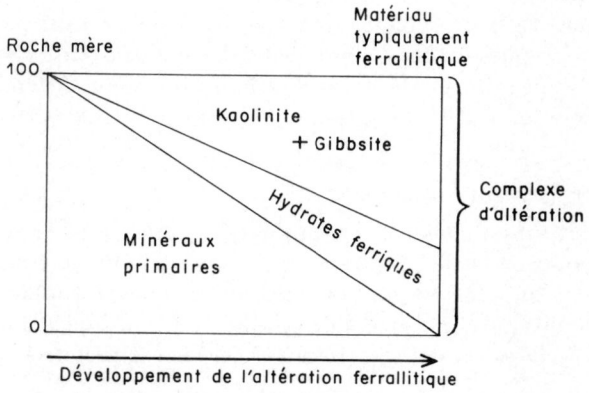


FIG. 6. — *Représentation schématique de l'altéroplasmation ferrallitique*

Ainsi, *l'altération ferrallitique*, qui se traduit par l'individualisation d'un « matériau ferrallitique », recouvre en fait un type d'altération donné (désalcalinisation totale des minéraux primaires) et un degré d'altération égal ou voisin de 100 (réserve minérale nulle), ce qui signifie une disparition complète des constituants primaires vulnérables de la roche. Au total, elle aboutit à la formation d'un « plasma d'altération » (altéroplasma) particulier constitué d'argile kaolinique saturée en cations basiques et d'hydrates ferriques, que l'on peut représenter suivant le schéma reproduit dans la figure 6. C'est l'*altéroplasmation* [1] *ferrallitique*.

[1] Dans le sens de BOULET (1974).

b) *L'évolution pédoplasmique au cours de la ferrallitisation.*

A partir de ce stade, et notamment au sein des horizons B, ce sont les phénomènes de *pédoplasmation* (FLACH *et al.*, 1968) qui entrent en jeu et deviennent fondamentaux. Toutefois, ils ne conduisent pas comme on l'a admis pendant longtemps, à une organisation pédologique établie suivant un modèle unique et immuable. Nous avons vu au contraire, lors de l'étude des *Terra roxa*, que la microstructure réalisée au départ avait tendance à évoluer en raison, d'un côté de la désaturation du complexe argileux et de la ferrisation superficielle qui en découle, et d'un autre de la purification des hydrates ferrifères conduisant à leur cristallisation.

Ce sont donc des processus géochimiques de *second ordre*, tels qu'ils ont été représentés dans la figure 4 et s'adressant ainsi :

— soit à l'état *physicochimique* du complexe argileux,

— soit à l'état *cristallochimique* des composés ferrugineux indépendants,

qui sont, en définitive, à l'origine des transformations pédoplasmiques susceptibles de se produire dans le profil et ce, jusqu'à l'individualisation *in fine* d'horizons à structure aliatique essentiellement micronodulaire (pseudoparticules). Cette seconde phase de la pédogenèse au cours de laquelle les processus d'altération à proprement parler n'entrent plus en ligne de compte, constitue ce qu'on peut appeler l'*évolution ferrallitique*.

Dès lors, il est aisé de comprendre que, suivant le stade de l'évolution, des matériaux ferrallitiques peuvent présenter des *visages* pédologiques différents : aussi les sols latéritiques les plus typiques (c'est-à-dire à horizon oxique ou latosolique) sont-ils toujours les plus évolués, donc généralement les plus vieux ; à l'opposé, les profils ferrallitiques les moins caractéristiques du point de vue de la structure sont d'une manière habituelle des profils relativement jeunes ou peu évolués.

En conclusion, ce travail nous permet de dégager à propos de la pédogenèse ferrallitique deux éléments principaux :

1° La ferrallitisation constitue un processus *continu* dans le temps qui semble résulter du développement de 2 sortes de phénomènes : l'un correspond à l' « altération ferrallitique » avec néoformation d'un matériau ferrokaolinique et l'autre à l' « évolution ferrallitique », qui se manifeste sous l'angle pédoplasmique et qui aboutit *in fine* à l'individualisation d'un horizon oxique bien caractérisé (type Roterde de KUBIENA).

2° Le développement complet d'un sol ferrallitique *typique* (c'est-à-dire présentant un horizon oxique) nécessite, non seulement la réalisation de processus fondamentaux, tels la disparition complète des minéraux primaires de la roche et l'individualisation d'un complexe d'altération essentiellement kaolinogibbsitique, mais *aussi* de phénomènes secondaires, comme la désaturation et la ferrisation du complexe argileux d'une part et la cristallisation progressive des composés ferrifères indépendants d'autre part.

Envisagée de cette manière, la ferrallitisation résulte donc de la mise en jeu d'un certain nombre de phénomènes qui apparaissent comme étant bien structurés et hiérarchisés. Certes, jusqu'à présent, l'accent a été mis plus spécialement sur la première phase de l'évolution, qui est celle de l'*altération* à proprement parler ; mais,

à la lueur de cette analyse, il semble bien maintenant que la seconde phase (*pédoplasmation*) soit tout aussi importante, si l'on veut appréhender plus complètement ce type de pédogenèse.

Reçu pour publication en juillet 1976.

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé grâce au support financier de la F.A.P.E.S.P. (Fundaçao de Amparo Pesquisa do Estado do São Paulo), que les auteurs remercient vivement. Ils remercient également MM. P. Bonfils du Service d'Étude des Sols de Montpellier, Lj. Nalovic du Centre ORSTOM de Cayenne (Guyane) et F. K. Seddoh de l'Université du Bénin (Togo) pour les diverses analyses spécifiques qu'ils ont eu l'amabilité de réaliser sur quelques échantillons de Terra Roxa.

SUMMARY

RESEARCH WORK CONCERNING THE CONSTITUTION AND FORMATION OF THE *TERRA ROXA ESTRUCTURADA* OF BRAZIL. INTRODUCTION TO THE STUDY OF FERRALLITIC PEDOGENESIS

This paper concerns the *Terra Roxa, i.e.* the ferrallitic soils of Brazil formed at the expense of the basalt sheet of Parana. It aims more precisely at defining the place of the *Terra Roxa Estructurada* (*T.R.E.*) with respect to the *Terra Roxa Legitima* (*T.R.L.*) on the one hand and ferrallitic soils in general on the other hand.

After having stated at first that the solution of the problem faced was neither a question of mineralogy (type of secondary minerals formed), nor of texture, the authors attempt to precise very carefully *T.R.E.* organization (in comparison with *T.R.L.*) in coppling the data related to particle-size distribution and micromorphology and in trying to link them with aspects partaking into the external physicochemistry of the alteration complex and its more or less important reactivity in function of environment conditions. It leads thus to the conclusion that the difference between the various *Terra Roxa* is mainly a question of pedoplasmic nature, the nature of the individualized organization resulting from the continuous deionization of the material which induces at the same time the superficial Fe-adsorption of the secundary constituents and the gradual inactivation of clay material. Consequently all the intermediary stages between a ferrallitic soil (Latosol-Oxisol) in which all the clay would be free and a second one in which it would be completely hidden are possible. Under these conditions when the amount of free clay is predominant, we are in presence of *T.R.E* ; on the contrary when hidden clay is predominant, we are more specially in presence of *T.R.L.* soils.

These basic elements lead us to enlarge the discussion and to show that ferrallitic pedogenesis is composed in fact by two types of phenomena : one related to the alteration of primary minerals with neo-formation of aluminous and aluminosilicic secundary constituents (gibbsite-kaolinite) (ferrallitic alteroplasmation) and the other to pedoplasmic transformations resulting from the secundary evolution of the ferriferous hydrates and exchange complex : (ferrallitic pedoplasmation). Different possibilities may exist during this second phase ; it is thus obvious that a soil of ferrallitic nature may present different facies, the more advanced ones being automatically those defined by an almost total blocking of clay and therefore by an « aliatic » micronodular structure (typical Oxisol).

ZUSAMMENFASSUNG

FORSCHUNGEN ÜBER DIE ZUSAMMENSETZUNG UND BILDUNG DER *TERRA ROXA ESTRUCTURADA* IN BRASILIEN. EINLEITUNG ZUR UNTERSUCHUNG DER FERRALLITISIERUNG

Es handelt sich hier um die *Terra Roxa, d.h.* um die ferrallitischen Böden Brasiliens, die sich auf der Parana Basaltdecke Kosten entwickelt haben. Der genauere Zweck dieser Untersuchung ist es, die Stelle der *Terra Roxa Estructurada* (*T.R.E.*) gegenüber den *Terra Roxa Legitima* (*T.R.L.*) einerseits und den ferralitischen Böden insgemein zu bestimmen.

Nachdem es von vornherein festgestellt wurde dass die Lösung des betrachteten Problems weder eine mineralogische Frage (Art von gebildeten sekündären Mineralien) noch eine Frage von Gefüge war, versuchen die Verfasser den ausführlichen Aufbau der *T.R.E.* (im Vergleich mit den *T.R.L.*) zu geben, indem sie Korngrösseverteilungsdaten und mikromorphologischen Daten zusammenstellen und indem sie versuchen, diese mit durch die aüssere physikalische Chemie des Verwitterungs-komplexes bedingten Aussichten und mit der mehr oder weniger beträchlichen Reaktionsfähigkeit dieses Komplexes nach den Umweltbedingungen in Zusammenhang zu bringen. Das führt zu erweisen dass der Unterschied zwischen den verschiedenen *Terra Roxa* hauptsächlich eine Frage pedoplasmischer Natur ist, da die Art vom abgesonderten Aufbau der ununterbrochenen Deionisation des Materials folgt, die zugleich die oberflächliche Fe-Adsorption der sekundären Bestandteile und die zunehmende Inaktivierung des Tonmaterials hervorruft. Infolgedessen werden alle Übergangsstadien zwischen einem ferrallitischer Böden ((Latosol-Oxisol), in dem der gesamte Ton frei wäre, und einem zweiten, in dem dieser ganz vaedeckt wäre, möglich. Unter diesen Bedingungen wenn die Menge freies Tons vorherrscht, handelt es sich um die *T.R.E.* ; im Gegenteil wenn der bedeckter Ton vorherrscht, handelt es sich insbesondere um Böden des *T.R.L.* Typs. Von diesen Grunddaten an wurde die Diskussion erweitert und es wurde folglich festgestellt dass, die Ferrallitisierung tatsächlich aus zwei Erscheinungstypen besteht der eine bezieht sich auf die « Verwitterung » der primären Mineralien mit Neubildung von tonerdehaltigen und silikatischen tonerdehaltigen) sekündären Bestandteilen (Gibbsit-Kaolinit) (ferrallitische Alteroplasmation) und der andere auf die auf die sekundäre Entwicklung der eisenhaltigen Hydrate und des Austauschkomplexes folgenden Veränderungen : (ferrallitische Pedoplasmation). Verschiedene Möglichkeiten können sich während dieser zweiten Phase verwirklichen, es ist also klar dass ein, durch Ferrallitisierung gebildeter Böden verschiedene Aussehen darbieten kann ; die mehr verwandelten davon sind notwendigerweise die durch ein beinahe völliges Tonblockieren und also durch eine mikroknötchenreiche « aliatische » Struktur (typischer Oxisol) gekennzeichneten.

РЕЗЮМЕ

Исследование состава и образования почв « Терра Роха Эструктурада» в Бразилии. — Введение в изучение ферралитического почвообразования.

Г. ПЕДРО, А. ШОВЕЛЬ, А. Ж. МЕЛЬФИ.

В данной работе изучаются почвы « Терра Роха», то-есть ферралитические почвы Бразилии, развившиеся за счет базальтовой пелены Параны. И, главной целью этого труда, является определение места занимаемого почвами « Терра Роха Эструктурада» (Т.Р.Э.) по отношению почв « Терра Роха Легитима» (Т.Р.Л.) с одной стороны и по отношению к ферралитическим почвам вообще, — с другой.

Определив прежде всего, что разрешение поставленной задачи, не является вопросом чисто минералогического (типы порожденных вторичных минералов), или структурального порядка, авторы стараются уточнить в деталях организацию Т.Р.Э. (по сравнению с Т.Р.Л.), попарно рассматривая гранулометрические и микроморфологические данные, и пытаясь связать их с аспектами относящимися к внешней физико-химии комплекса выветривания, и, с его, более или менее, сильной реактивностью, в зависимости от условий среды. И, таким образом, удается доказать, что различия между разными « Терра Роха» носят главным образом характер *педоплазматический*, так как природа индивидуализировавшейся организации проистекает от постоянной дезионизации материала, что и вызывает одновременные поверхностное ожелезнение вторичных составных, и прогрессивную инактивацию глинистого материала. Отсюда вытекает возможность всех промежуточных стадий между ферралитической почвой, в которой вся глина находится в свободном виде, и стадией в которой вся глина замаскирована. В этих условиях, в случаях преобладания в материале свободной глины, он будет находиться в положении Т.Р.Э.; и, напротив, в случае преобладания замаскированной глины, мы будем иметь дело с почвами типа Т.Р.Л.

Основываясь на этих данных, явилась необходимость расширить вопрос, и доказать что все ферралитическое почвообразование состоит в действительности из явлений двух сортов : один из них относится к « выветриванию » первичных минералов с неообразованием вторичных алюминиевых, или алюмино-кремниевых составных (гибсит — каолинит) — *Ферралитическая альтероплазмация*, а другой — к педоплазматическим превращениям, зависящим от вторичной эволюции железоносных гидратов и обменного комплекса — *Ферралитическая педоплазмация*. Но, в виду существования очень разных возможностей реализации в течении этой второй фазы, ясно, что почва ферралитической природы может представить разные аспекты, среди которых автоматически наиболее эволюировавшими являлись почвы характеризующиеся полной блокировкой глины, и, значит, алиатической микрозернистой структурой (типичные Оксисолы).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUBERT G., 1954. Les sols latéritiques. *5e Cong. int. Sci. Sol.*, Léopoldville, **1**, 103-118.

BAUER M., 1898. Über die Natur des Laterits. *Peterm. Mih*, **44**, 280-283.

BENNEMA J., JONGERIUS A., LEMOS R. C., 1970. Micromorphology of some oxic and argillic horizons in south Brazil in relation to weathering sequences. *Geoderma*, **4**, 333-355.

BONFILS P., DUPUIS M., 1969. Étude de la dispersion des colloïdes du sol à l'aide des vibrations ultrasonores. *Bull. A.F.E.S.*, **1**, 13-22.

BOULET R , 1974. *Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Équilibres dynamiques et bioclimats.* Thèse ORSTOM, Strasbourg, Ronéo, 330 p.

BRAMAO D. L., SIMONSON R. W., 1956. *Terra Roxa and Rubrozem soils of Brazil*, F.A.O., Mimeo.

BREWER R., 1964. *Fabric and mineral analysis of soils*, J. Wiley and sons, 470 p.

CARVALHO A., 1970. *Study of Terra Roxa Estructurada and Latossolo Roxo on a topographic sequence in Sao Paulo State (Brazil).* Th. Master. Newcastle upon Tyne, Mimeo, 93 p.

CHATELIN Y., 1972. Les sols ferrallitiques. *Doc. Tech. ORSTOM*, **1**, 98 p.

CHATELIN Y., MARTIN D., 1972. Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM Pédologie*, X, 1, 25-44.

CHAUVEL A., 1976. *Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Évolution et réorganisation des sols rouges de Moyenne Casamance* (Sénégal). Thèse, Strasbourg. 1 Vol. ORSTOM, 495 p.

CHAUVEL A., FAUCK R., 1969. Sur la mise en évidence et la caractérisation d'un horizon B dit « de comportement » dans les sols rouges de Casamance (Sénégal). *Compte rendu Ac. Sci.*, Paris, **269** D, 2080-2083.

CHAUVEL A., PÉDRO G., TESSIER D., 1976. Rôle du fer dans l'organisation de matériaux kaolinitiques. Études expérimentales. *Science du Sol*, **2**, 101-113.

COMISSÃO DE SOLOS C.N.E.P.A., 1960. *Levantamento de Reconhecimento dos solos do estado de São Paulo*, 634 p., 1 carte 1/500 000.

C.P.C.S., 1967. *Classification des sols*. Paris, Mimeo.

FLACH K. W., CADY J. G., NETTLETON W. D., 1968. Pedogenic altération of highled weathered parent materials. *9th Int. Cong. Soil Sci.*, Adelaïde, IV, 343-351.

HARRASSOWITZ H., 1926. Laterit. *Fortschr. Geol. Paleont*, Berlin, **4**, 253-565.

HARRISON J. B., 1933. *The katamorphism of igneous rocks under humid tropical conditions*. Imperial Bureau of Soil Science, Harpenden, 79 p.

KUBIENA W. L., 1950. Zur Mikromorphologie der braunen und roten tropenböden. *Trans. 4th Int. Cong. Soil Sci.*, Amsterdam, **1**, 304-307.

LARUELLE J., 1956. Quelques aspects de la microstructure des sols du nord-est du Congo belge. *Pédologie*, IV, 38-57.

MAIGNIEN R., 1966. *Compte rendu de recherches sur les latérites*. U.N.E.S.C.O., 155 p.

MONIZ A. C., JACKSON M. L., 1970. *Quantitative mineralogical analysis Brazilian soils derived from basic rocks and slate*. Madison Wisconsin, Soil Science Report, n° 212, 75 p.

MONNIER G., STENGEL P., FIÈS J.-C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente des petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. agron.*, **24** (5), 533.

NALOVIC Lj., 1971. Comportement du fer en présence des éléments de transition dans la nature. *C. R. Acad. Sci., Paris*, **273**, 1664-1667.

NALOVIC Lj., 1974. *Recherches géochimiques sur les éléments traces dans les sols. Étude expérimentale de l'influence des éléments traces sur le comportement du fer et l'évolution des composés ferrifères au cours de la pédogenèse*. Thèse ORSTOM, Paris, 289 p.

PÉDRO G., 1973. La pédogenèse sous les tropiques humides et la dynamique du potassium. *X^e colloque Inst. Int. Potasse Abidjan*, 23-49.

PÉDRO G., DELMAS A. B., SEDDOH F. K., 1975. Sur la nécessité et l'importance d'une distinction fondamentale entre type et degré d'altération. Application au problème de la définition de la ferrallitisation. *C. R. Acad. Sci., Paris*, **280** D, 825-828.

ROBINSON G. W., 1928. The nature of clay and its significance in the weathering cycle. *Nature*, **121**, 903.

SCHWERTMANN U., 1964. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat Lösung. *Z. Pflanz. Dungung*, **105**, 194-202.

STOOPS G., 1968. Micromorphology of some characteristic soils of the lower Congo (Kinshasa). *Pédologie*, 110-147.

SYS C., 1960. Principles of soil classification in the Belgian Congo. *7th Int. Cong. Soil Sci.*, IV, 112-118, Madison.

TESSIER D., 1975. *Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles*. Thèse C.N.A.M., Paris, 231 p.

TESSIER D., PÉDRO G., 1976. Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux. *Science du Sol*, **2**, 85-99.

THORP J., SMITH G. D., 1949. Higher categories of soil classification. *Soil Sci.*, **67**, 117.

U.S.D.A. YEARBOOK, 1938. *Soil classification*, 979-1001 (par M. BALDWIN, Ch. E. KELLOGG et J. THORP).

U.S.D.A. SOIL CONSERVATION SERVICE, 1960. *Soil classification. A comprehensive system* (7th approximation).

Ann. agron., 1976, **27** (3), 295-325.

CLIMAT, STABILITÉ STRUCTURALE ET BATTANCE ESSAI D'ANALYSE D'UN COMPORTEMENT DU SOL AU CHAMP

J. BOIFFIN et M. SEBILLOTTE
avec la collaboration de L. JOMIER et C. PARIS [1]

Chaire d'Agriculture,
Institut national agronomique Paris-Grignon,
75231 Paris

RÉSUMÉ

A l'aide d'observations visuelles et d'instruments de mesure simples, on a suivi l'évolution structurale au cours de l'hiver, de deux parcelles de même texture limoneuse, différant par leur richesse en matière organique.

La surface du sol se dégrade selon une succession de phases dont l'ordre et la définition ne sont pas modifiés par les variations de climat, d'état structural initial ou de stabilité structurale du sol. L'ensemble de la couche travaillée s'affaisse progressivement sous l'action des pluies, d'abord rapidement à la suite du travail par bêchage, puis très lentement.

Il apparaît diverses corrélations entre les événements climatiques et le déroulement de ces processus. L'action directe des pluies n'est pas seule en cause. L'effet d'humectation et le rôle de l'excès d'eau semblent déterminants. La notion de pluie battante paraît peu fondée dans le milieu étudié.

L'effet d'un enrichissement du sol en matière organique consiste à ralentir la dégradation de surface, à en limiter l'intensité, à restreindre l'amplitude du remaniement de la couche travaillée, sans modifier l'allure générale de ces évolutions.

Enfin, le rôle de l'état structural initial et le mécanisme de l'évolution de la porosité structurale sont discutés. Une formulation synthétique est proposée.

INTRODUCTION

Les travaux consacrés aux sols battants se sont attachés aux mécanismes responsables de leur comportement spécifique face à celui des autres sols. L'accent a, ainsi, été mis sur l'étude de la stabilité structurale, propriété intrinsèque du matériau terre, et qui désigne sa plus ou moins grande aptitude à résister à la dégradation

[1] Étudiants à l'I. N. A., Section agriculture.

de son état structural sous l'action de l'eau (HÉNIN, 1938 ; MONNIER, 1965 ; CONCARET, 1967 ; KHEYRABI et MONNIER 1968).

Or la battance est un comportement global du sol en place sous l'action du climat. Si les travaux précédents permettent de comprendre les mécanismes de destruction des éléments structuraux lors de leur humectation, ils n'apportent que peu d'éléments concernant l'extériorisation de ce comportement au champ dont on sait, par ailleurs, que pour un même climat il dépendra de l'état structural initial (BOIFFIN, SEBILLOTTE et DUBY 1975).

Les mécanismes d'action du climat, et tout particulièrement de la pluie, dans cette extériorisation d'un état battu par un sol à faible stabilité structurale restaient à étudier. En effet, les travaux entrepris pour étudier les mécanismes de l'érosion hydrique (SMITH et WISCHMEIER, 1957 ; WISCHMEIER et SMITH, 1958 ; FOURNIER, 1960) qui insistaient entre autres sur l'action mécanique des gouttes de pluie sur les éléments structuraux de la surface du sol privilégiaient, *in fine*, les transports solides plutôt que l'évolution globale du sol en place.

Pour essayer de définir ce qu'est un climat battant et tout particulièrement une pluie battante, c'est-à-dire une pluie provoquant l'apparition du caractère battu sur un sol en place, on pouvait songer à l'emploi d'un simulateur de pluie. Mais outre que l'appareil aurait d'abord dû être construit, son emploi aurait été délicat : il aurait fallu travailler soit au laboratoire sur des sols modèles et l'on risquait alors des distorsions importantes vis-à-vis du comportement au champ, soit à l'extérieur et ceci, sous climat parisien, n'aurait pas dispensé de l'étude directe de la pluie.

En effet, une des hypothèses de départ était que l'extériorisation de la battance dépend de l'histoire des relations climat-sol.

On a donc préféré observer des situations au champ en leur appliquant le maximum de contrôles concernant le sol et le climat.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. — *Localisation*

On a travaillé sur le dispositif dit des « 42 parcelles » au Centre National de la Recherche Agronomique à Versailles. Il est situé à proximité immédiate d'une station météorologique qui permet, en particulier, l'évaluation de l'intensité des pluies.

Sur ce dispositif, établi en sol limoneux battant, on a retenu une parcelle témoin (T) sans apport de matière organique et une parcelle recevant environ 100 tonnes de fumier par hectare et par an depuis 40 ans (F). Les caractéristiques de leur sol sont données dans le tableau 1.

B. — *Le climat*

Il s'agit d'un climat océanique. Les principales données des deux campagnes d'observations sont condensées dans le tableau 2. On retiendra, en outre, l'absence de pluie de forte intensité moyenne (intensité inférieure à 10 mm/h très généralement) et l'absence de journées très pluvieuses : 3 journées de plus de 10 mm/j de précipitations cumulées en 1970-71 et 6 en 1971-72 sur les périodes d'observation.

Il faut également noter l'absence de gelées importantes, soit par la durée de la période, soit par la température minimum atteinte. En 1971-72 le sol n'a pratiquement pas gelé, sauf quelques journées fin janvier, début février.

TABLEAU I

Caractéristiques des sols étudiés

a) *Granulométrie commune aux deux parcelles* (en p. 100 de terre fine) :

argile 0-2 μ	18,5
limon 2-20 μ	23,8
limon 20-50 μ	36,6
sable fin 50-200 μ	18,0
sable grossier 200-2 000 μ	3,1

b) *Autres caractéristiques :*	Parcelles	
	T	F
Carbone total (%)	7,00	24,40
Azote total (%)	1,18	2,67
Humidité à la capacité au champ (%)	23,0	29,0

TABLEAU 2

Principales données climatiques par périodes d'observation

1970-71	29-10 13-11	14-11 24-11	25-11 30-11	01-12 11-12	12-12 08-01	9-1 22-1	23-1 29-1	30-1 18-2	19-2 01-3	2-3 15 3	16-3 30-3	31-3 29-4
Pluie (mm)	17,6	25,5	1,5	16,9	15,4	14,5	40,9	29,0	4,8	3,4	16,0	32,8
Σ P (1)	24,2	49,7	51,2	68,1	83,5	98,0	138,9	167,9	172,7	176,1	192,1	224,9
Évaporation du Piche (mm)	29,1	20,0	16,7	16,8	10,0	16,7	18,6	25,2	11,3	20,5	40,5	113,8
Σ Ep (mm)	29,1	49,1	65,8	82,6	92,6	109,3	127,9	153,1	164,4	184,9	225,4	339,2
t moyenne (°C)	9,5	6,9	9,4	6,4	— 1,2	4,5	6,6	4,2	3,5	0,6	6,1	10,1

1971-72	6-11 12-11	13-11 19-11	20-11 26-11	27-11 03-12	04-12 10-12	11-12 20-12	21-12 06-01	7-1 14-1	15-1 21-1	22-1 11-2	12-2 18-2	19-2 17-3
Pluie (mm)	12,1	15,5	28,4	7,4	2,0	1,1	18,3	14,5	32,5	50,7	24,4	46,7
Σ P (1)	12,1	27,6	56,0	63,4	65,4	66,5	84,8	99,3	131,8	182,5	206,9	253,6
Évaporation du Piche (mm)	7,8	7,2	6,0	2,2	2,5	8,1	8,3	4,7	5,6	20,0	6,4	43,3
Σ Ep (mm)	7,8	15,0	21,0	23,2	25,7	33,8	42,1	46,8	52,4	72,4	78,8	122,1
t moyenne (°C)	4,2	6,4	2,9	4,2	2,3	4,4	4,3	5,3	3,9	3,3	5,2	5,5

(1) Depuis le bêchage.

C. — *Méthode*

On peut définir la battance comme étant la dégradation de la surface d'un sol en place caractérisée par la désagrégation des mottes et de la terre fine accompagnée de la formation de dépôts à très faible perméabilité et à structure feuilletée horizontale. Cette dégradation entraîne une réduction de la rugosité de la surface du sol.

On peut retenir plusieurs origines à cette évolution de la surface du sol :

— une action mécanique directe des gouttes de pluie qui dépendra de leur énergie cinétique,

— une diminution de la cohésion des éléments structuraux en surface mais également en profondeur : un remaniement général de la couche travaillée entraînant progressivement un affaissement de la surface,

— une action du gel entraînant des soulèvements de l'ensemble de la surface ou de certains de ses éléments structuraux.

Ne pouvant envisager des observations détruisant la surface du sol en cours d'expérience, on a utilisé pour suivre ce phénomène des notations visuelles régulières accompagnées de photographies (toutes les semaines) et une estimation de la rugosité obtenue au moyen d'un aspérimètre à aiguilles. Cet appareil permet d'obtenir la cote, par rapport à une horizontale fixe, de chaque point de la surface le long d'une ligne droite (chaque point de mesure est équidistant de 1,3 cm). L'indice d'aspérité est, par définition, la longueur de la ligne brisée obtenue en joignant sur un graphique les points correspondant à chacune des cotes. Si le terrain est devenu plat l'indice a la valeur (1) minimum de :

2,5 en 1970-71 ; 12,7 en 1971-72.

Sur chaque traitement et à chaque date d'observation on procède à deux mesures de l'indice d'aspérité sur deux lignes définies *a priori* pour toute l'expérience et de 127 cm de longueur.

L'évolution de la cote moyenne reflète l'évolution interne du profil et sa perte progressive de porosité structurale puisque le fond de la partie de sol travaillé a une cote fixe.

L'énergie cinétique des gouttes de pluie est estimée par les intensités moyennes de chaque précipitation obtenues à la station météorologique voisine.

L'humidité influe sur la résistance des fragments terreux (Hénin *et al.*, 1969). Elle est appréciée chaque semaine par des prélèvements effectués dans la même parcelle, au voisinage de la surface observée. L'existence même d'une rugosité entraîne une distribution irrégulière de cette humidité. On a distingué, la première année d'expérience, les mottes et la terre fine sur laquelle elles sont posées (les résultats figurent sur la fig. 1).

Ne pouvant procéder à l'établissement régulier de profils hydriques, il a été impossible d'estimer l'évaporation du sol nu ni son humidité en profondeur. Une approche indirecte est obtenue par la considération des valeurs de l'évaporomètre Piche de la station météorologique.

En définitive les quantités de pluie cumulées seront retenues, *a priori*, comme caractéristique climatique importante pour repérer le déroulement des phénomènes. Cependant la variation de la cohésion des éléments structuraux peut provenir d'une évolution de la stabilité structurale du matériau. Il importait d'isoler ce phénomène, ce qui a entraîné la détermination de la stabilité structurale. L'étude de son évolution, confirmant ce que l'on savait par ailleurs, cette détermination (coûteuse en temps) n'a pas été reprise la seconde année.

Cette seconde année est apparue nécessaire pour obtenir une variation de l'agent causal de la battance, à savoir le climat.

Enfin, il était intéressant de vérifier qu'un enrichissement en matière organique, qui entraîne des comportements différents à granulométrie constante par accroissement de la stabilité structurale, modifiait l'action battante des pluies. Ceci explique le choix des deux parcelles retenues.

Le sol de ces deux parcelles a été bêché sur 25 cm d'épaisseur les 11 octobre 1970 et 5 novembre 1971. Les humidités étaient respectivement de :

	(P. 100)
1970-71	
parcelle F	30,1
parcelle T	20,4
1971-72	
parcelle F	19,5
parcelle T	16,0

(1) La mesure de cette ligne brisée se fait sur graphique. En 1970-71, ceci s'est opéré sur une échelle différente de 1 pour l'équidistance entre points d'observation, contrairement à 1971-72 où l'échelle retenue est 1. Il en résulte l'impossibilité d'une comparaison absolue des indices entre campagnes.

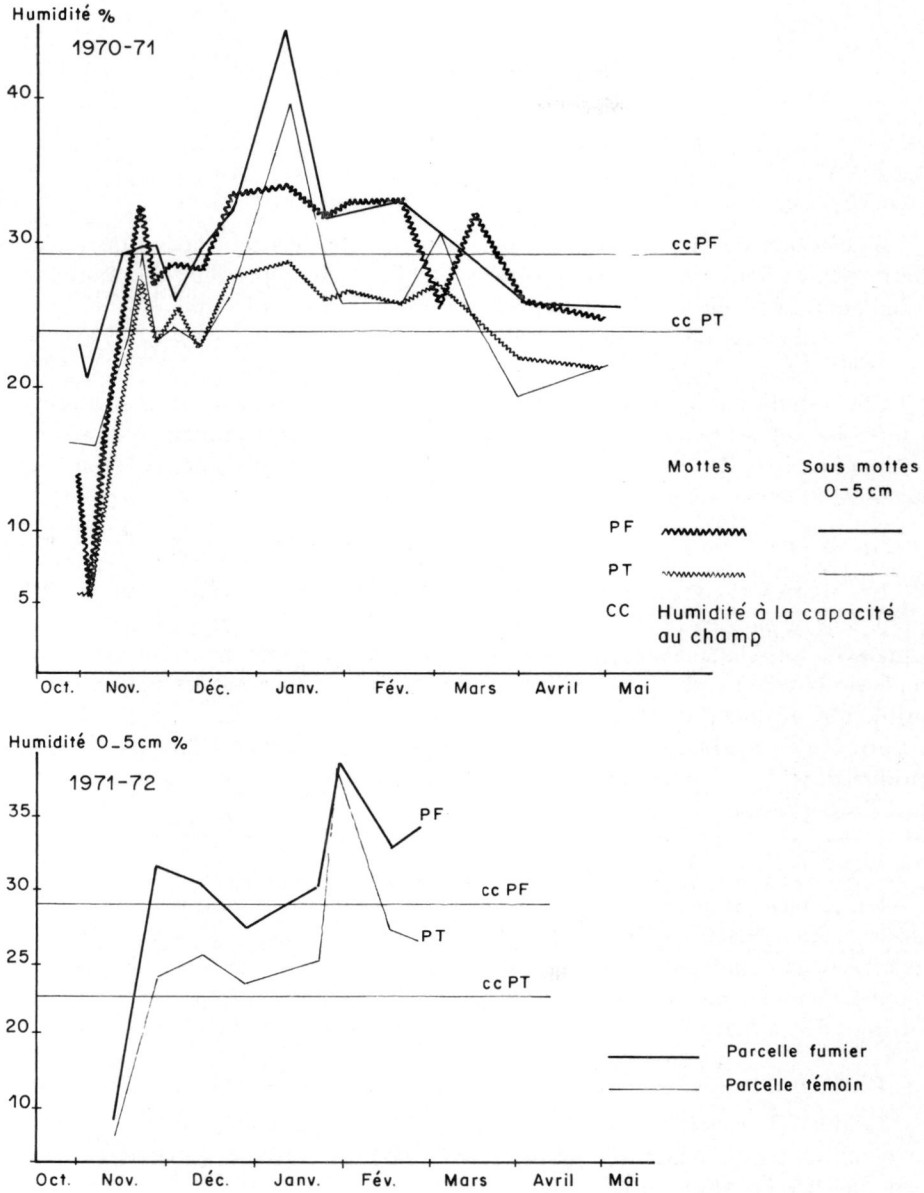


FIG. 1. — *Évolution de l'humidité du sol dans la couche superficielle.*

Le bêchage a entraîné en 1971-72 la formation d'une quantité beaucoup plus importante de terre fine et de nettement moins de mottes qu'en 1970-71. L'humidité du sol, lors de cette opération, correspondait sensiblement au point d'intersection des courbes de cohésion et d'adhérence, c'est-à-dire l'humidité la plus propice à la formation de terre fine (HÉNIN *et al.*, 1969).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. — *Observation visuelle de la dégradation de la surface*

a) *Description.*

L'évolution de la structure en surface peut être décrite schématiquement en quatre phases dont les dates d'apparition et l'intensité dépendent des traitements et de l'année. Ces phases se sont toujours succédées dans l'ordre suivant :

Phase I :

Elle débute au bêchage. Les premières pluies qui lui succèdent désagrègent la terre fine et les petites mottes (inférieures à 1 cm) qui prennent une structure continue. La base des mottes se soude légèrement au reste de la surface. Leur forme, leur taille, sont peu affectées.

Phase II :

Les mottes s'érodent. Leurs arêtes s'émoussent, leurs raccords avec la surface s'empâtent de plus en plus, des coulées de boue apparaissent sur les faces inclinées ; les faces de forte inclinaison ou exposées aux vents dominants montrent des arrachements de terre où restent en saillie les sables grossiers. Ce sont les mottes les plus petites qui évoluent le plus vite. L'évolution semble s'accélérer progressivement, de sorte qu'on a l'impression, en fin de phase, d'une fusion relativement brusque du microrelief : c'est alors qu'apparaissent de façon massive les dépôts colmatants dans les dépressions.

Phase III :

La surface se colmate progressivement : les mottes continuent à s'éroder, mais c'est l'évolution des dépôts dans les dépressions qui est la plus sensible à l'œil : ils s'étendent, comblent les orifices et les anfractuosités, ennoient plus ou moins complètement les mottes restantes. Dans les dépressions les plus profondes et les plus fermées, a lieu un tri par sédimentation des particules élémentaires dissociées.

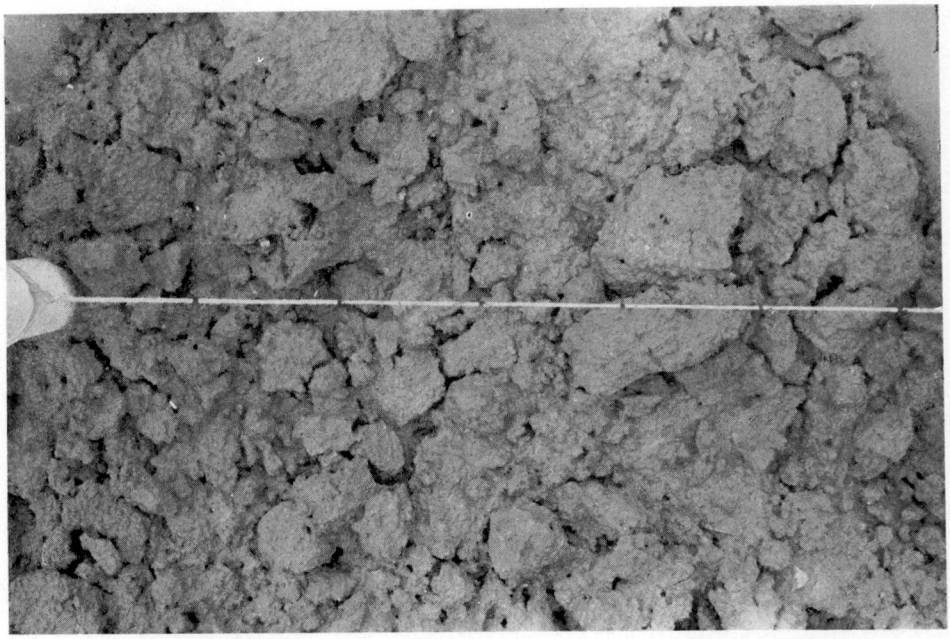
Phase IV :

Le relief de la surface semble ne plus évoluer malgré la poursuite des pluies. Le début de cette phase est imprécis. Des fissures peuvent apparaître à l'issue d'une période de dessiccation.

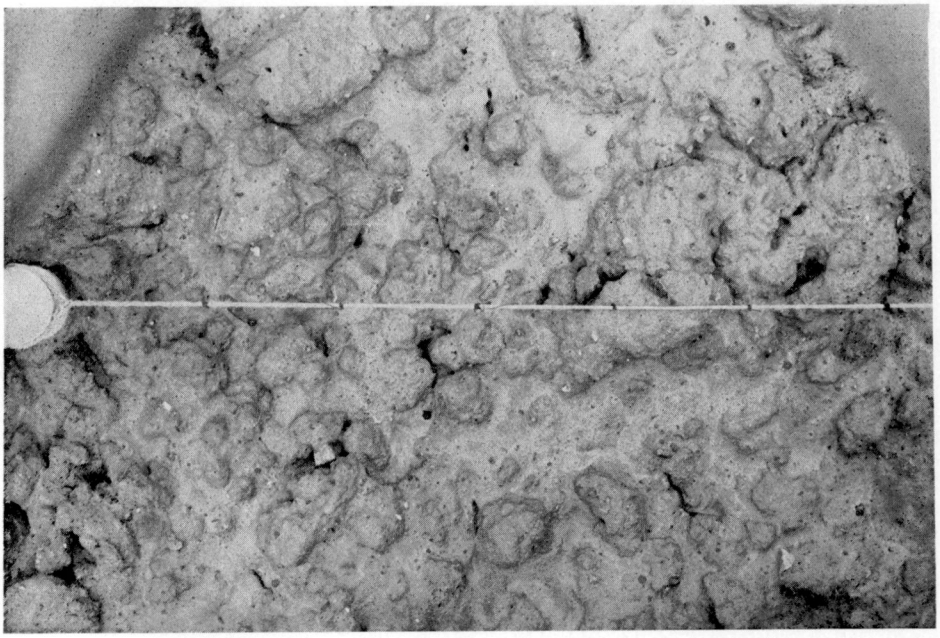
On recoupe des observations antérieures (SEBILLOTTE, 1966 ; HÉNIN *et al.*, 1969).

Les clichés 1 à 4 illustrent pour les parcelles « témoin » et « fumier » des situations caractéristiques des phases II et III. On peut nettement suivre l'évolution, en 1970-71, des mottes et de la surface du sol du 18 décembre au 18 février.

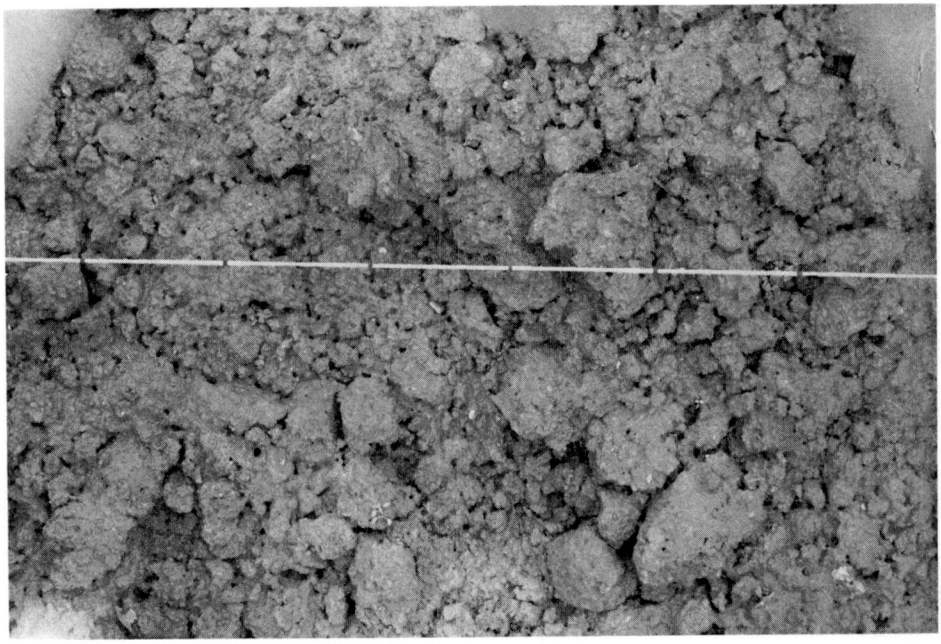
La parcelle fumier passe par les mêmes phases mais évolue avec retard par rapport au témoin, comme le montre la lecture du tableau 3 où sont consignées les dates approximatives d'apparition des phases définies ci-dessus. Ce retard varie d'une année



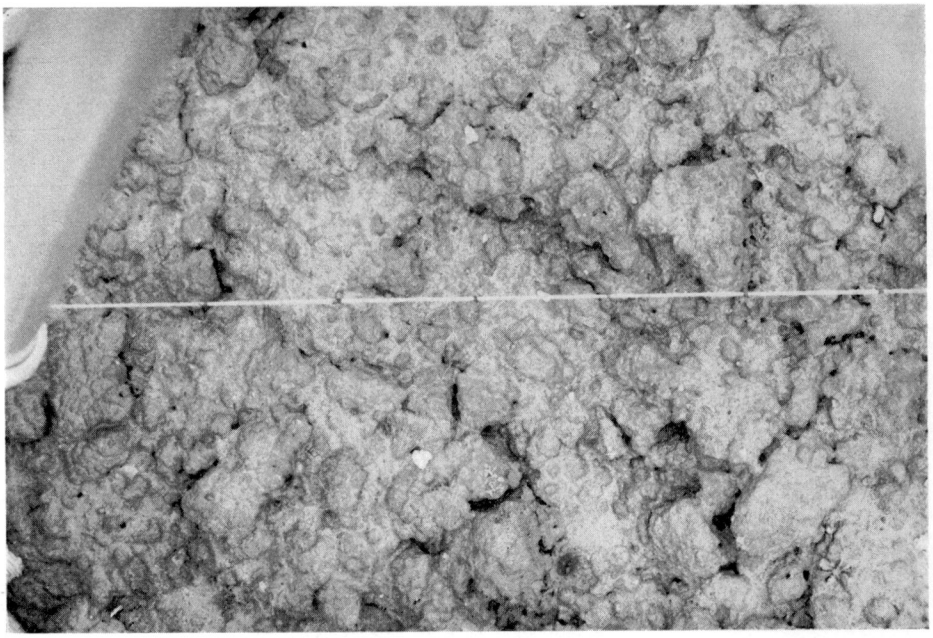
Cliché 1. — Témoin en cours de phase II (18 décembre).



Cliché 2. — Témoin en cours de phase III (18 février) même zone que cliché 1.



Cliché 3. — Fumier au 18 décembre (en tout début de phase II).



Cliché 4. — Même zone que cliché 3 au 18 février (en cours de phase III).

à l'autre. En outre la dégradation de la structure se produit avec moins d'intensité dans les parcelles fumier, particulièrement pendant la phase III. Les mottes sont moins érodées, l'extension des dépôts est moindre, et il reste plus d'orifices à la surface du sol. Sur un certain nombre des photographies prises aux différentes dates d'observation, on a déterminé, sur 5 perpendiculaires de 20 centimètres centrées sur l'axe de l'aspérimètre et régulièrement espacées, le nombre d'orifices [1] et la longueur des dépôts coupés par ces perpendiculaires.

TABLEAU 3

Caractères de la pluviométrie du bêchage à l'apparition des phases II et III de la dégradation de la surface

Pluviométries cumulées et nombre de jours de pluie dépassant un certain seuil depuis le bêchage		Parcelles			
		Fumier		Témoin	
		70-71	71-72	70-71	71-72
Pluviométrie cumulée au début de la phase II (mm)	Toutes pluies	68	28	50	12
	Seules pluies d'intensité sup. ou égale à 2 mm/h	19	11	12	8
	I ⩾ 4 mm/h	12	5	8	3
Nombre de jours de pluie avant le début de la phase II	De plus de 5 mm/j	4	2	1	1
	De plus de 10 mm/j	0	2	0	1
Pluviométrie cumulée au début de la phase III (mm)	Toutes pluies	139	100	98	50
	Seules pluies d'intensité ⩾ 2 mm/h	53	35	26	29
	I ⩾ 4 mm/h	31	14	12	14
Nombre de jours de pluie avant le début de la phase III	Plus de 5 mm/j	9	6	7	4
	Plus de 10 mm/j	2	3	1	3
Dates de début	Phase II	11-12	19-11	13-11 [1] 24-11	12-11
	Phase III	29-01	06-01 [1] 14-01	22-01	19-11 [1] 26-11

[1] = La fourchette de date indique que la phase a nettement débuté entre deux obsrevations.

[1] On entend par là l'ensemble des orifices de toute forme, qui peuvent être recensés à l'examen visuel de la surface du sol.

Les variations des indices obtenus en cumulant ces comptages et ces mesures, sont représentées sur la figure 2. On constate une réduction régulière du nombre d'orifices de la surface du sol, corrélativement à une augmentation de la longueur des dépôts. Le parallélisme entre les parcelles « fumier » et « témoin » est assez remarquable, mais la dégradation est moins intense sur la première, et l'accumulation des dépôts y est plus lente.

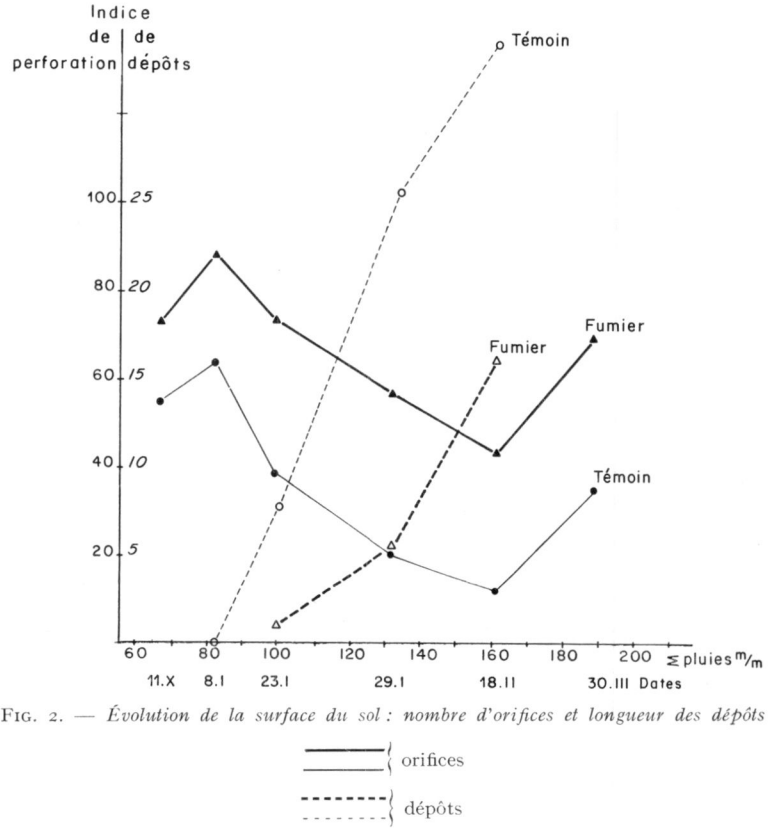


FIG. 2. — *Évolution de la surface du sol : nombre d'orifices et longueur des dépôts*

b) *Relation avec les facteurs climatiques et l'état hydrique du sol.*

Dans les tableaux 3 et 4 on a consigné les caractéristiques des périodes climatiques qui ont précédé l'apparition des phases II et III. Les débuts de celles-ci ne peuvent être reliés à une valeur constante de pluviométrie cumulée depuis le bêchage. Ainsi, en 1971-72, ces phases sont apparues à la suite d'un volume de pluies beaucoup plus faible qu'en 1970-71. Mais les pluies de 1971-72 étaient nettement plus intenses que l'année précédente : si l'on ne tient compte que des pluies d'intensité supérieure ou égale à 2 mm/h, on observe une certaine convergence des résultats des deux campagnes pour la parcelle témoin. Ce n'est pas le cas pour la parcelle fumier, et la considération de l'intensité des pluies n'est donc pas suffisante pour rendre compte

du déroulement de la battance dans cette situation. Il faut sans doute également envisager l'état hydrique du sol et donc l'ensemble des éléments du climat qui le déterminent, notamment l'évaporation. On remarque d'ailleurs que les jours avec précipitations intenses sont aussi ceux pour lesquels le total des pluies est le plus élevé. Le tableau 4 montre que l'apparition de la phase II suit :

— une seule période humide (évaporation Piche cumulée inférieure ou égale à la pluie de la période) pour les parcelles témoin, et ceci les deux années ;

— deux périodes humides, consécutives ou non, pour les parcelles fumier.

TABLEAU 4

Climat et apparition de la phase II

Années	Climat	Périodes (1)			
		1	2	3	4
1970-71	Pluie (mm)	17,6	25,5	1,5	16,9
	Piche (mm)	29,1	20,0	16,7	16,8
	Apparition phase II — Témoin — Fumier		× 		 ×
1971-72	Pluie (mm)	12,1	15,5		
	Piche (mm)	7,8	7,2		
	Apparition phase II — Témoin — Fumier	× 	 ×		

(1) Périodes d'observation (par ordre chronologique).

Ces faits sont à rapprocher de la constatation que les humidités du sol en surface (0-5 cm) sont depuis peu à la capacité au champ quand débute la phase II (fig. 1).

Par contre, l'apparition de la phase III ne semble pas pouvoir être liée à une humidité particulière du sol mais plutôt à la répétition de jours de pluie suffisamment pluvieux.

Les événements climatiques semblent ainsi jouer de façon décisive dans le déroulement de la battance tel qu'il peut être apprécié visuellement. Cependant dans la plupart des cas et quelque soit le type de précipitations considéré, les quantités de pluies correspondant au déclenchement des phases de dégradation sont plus élevées en 1970-71 qu'en 1971-72, notamment pour la phase II. Ceci est probablement à relier aux différences d'état structural créé par le bêchage. On rappelle qu'il était nettement plus fin en 1971-72.

2. — *Évolution de l'indice d'aspérité*

a) *Description* (fig. 3).

Tous les indices d'une même année [1] ont été ramenés à une origine commune (au bêchage) pour mieux comparer leur évolution. On remarque les faits suivants :

— chaque année l'évolution débute de façon très anarchique, puis une phase intermédiaire s'installe durant laquelle il n'y a pas de sens général de variation mais qui se caractérise par un certain parallélisme entre les différentes courbes. Ensuite

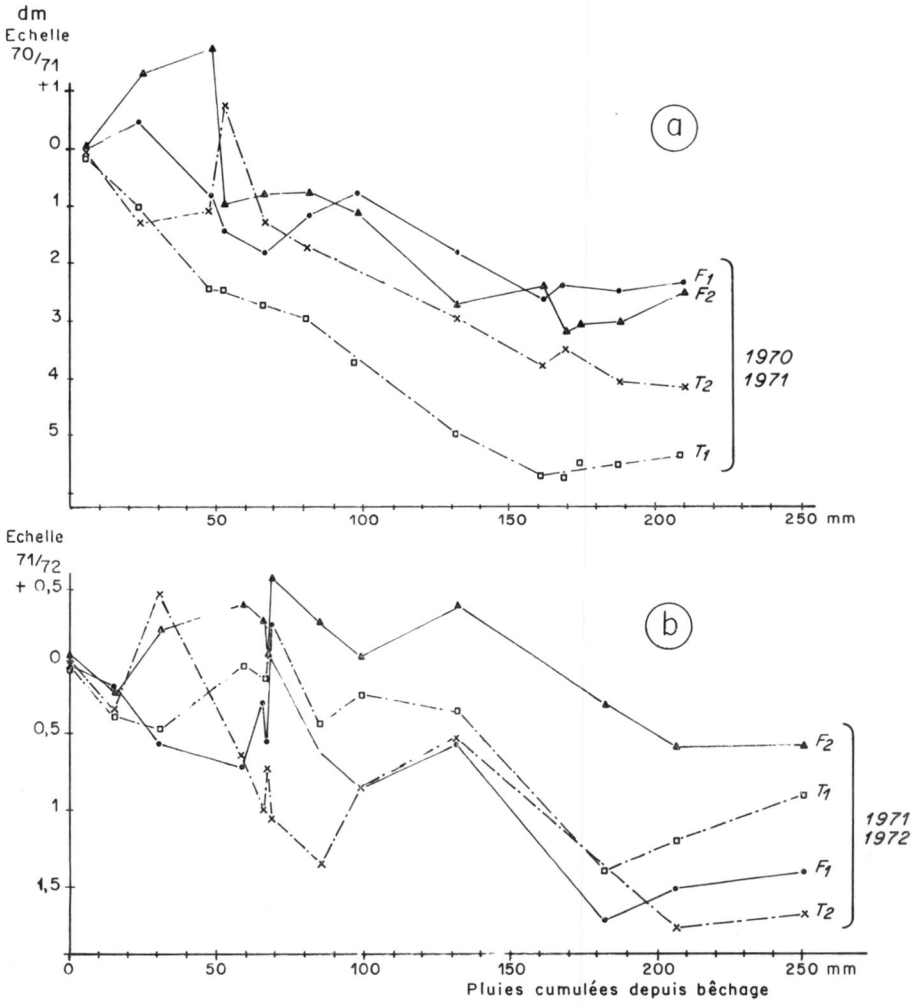


FIG. 3. — *Décroissance des indices d'aspérité en fonction des pluies*

Parcelle fumier F_1F_2
Parcelle témoin T_1T_2

[1] Il faut rappeler que les valeurs absolues des indices ne peuvent être comparées entre les deux années.

vient une phase de décroissance assez régulière de l'indice aspérité. Elle débute pour les deux parcelles :

en 1970-71 vers le 23 janvier,
en 1971-72 vers le 21 janvier.

Les deux années, on observe à partir de février-mars une dernière période de stabilisation relative. Les indices ont atteint des valeurs basses, voisines de la situation avant bêchage (contrôle en 2e année) mais encore nettement supérieures à la valeur d'un sol ayant perdu toute rugosité (tabl. 5).

TABLEAU 5

Valeurs de l'indice d'aspérité : avant et après le bêchage, à la fin des observations

Années	Traitements et répétitions		Indice d'aspérité		
			Avant bêchage	Après bêchage	A la fin des observations
1970-71	Fumier	F_1	— (1)	9,70	7,28
		F_2	—	9,50	7,10
	Témoin	T_1	— (1)	12,30	7,15
		T_2	—	9,65	5,60
1971-72	Fumier	F_1	14,39	16,25	14,84
		F_2	13,70	15,20	14,65
	Témoin	T_1	13,49	14,90	14,05
		T_2	13,22	15,80	14,10

Valeur de l'indice d'aspérité si le sol était lisse :

— 1970-71 2,5
— 1971-72 12,7

(1) Il n'y a pas eu de mesure.

— Les comportements des répétitions au sein d'un même traitement sont assez hétérogènes, surtout au cours de la première partie de l'évolution ;

— des différences entre traitements apparaissent, plus ou moins nettement, selon l'année. En 1970-71, la diminution globale de l'indice est nettement moindre pour le traitement fumier. En 1971-72, les courbes de variation de l'indice ne se discriminent pas nettement selon les traitements.

La période de diminution régulière de l'indice d'aspérité correspond sensiblement à la phase III des notations visuelles. Toutefois, en 1971-72, cette diminution régulière ne débute que nettement après le déclenchement de la phase III. La stabilisation finale de l'indice recouvre en gros la phase IV.

b) *Relation avec les autres caractéristiques du sol et avec les facteurs climatiques.*

L'interprétation des variations de cet indice est délicate pour plusieurs raisons :

— Les relevés des cotes entre deux dates successives ne correspondent pas exactement aux mêmes points de la surface du sol, en raison d'une certaine flexibilité des aiguilles de l'aspérimètre (2 à 3 mm de jeu latéral). Cette imprécision crée dans certains cas, surtout lorsque les reliefs de la surface sont accusés, des variations parasites de l'indice d'aspérité ;

— le relief de la surface du sol et son évolution dépendent des remaniements qui s'opèrent dans l'ensemble de la couche travaillée (cf. plus loin). Ce n'est qu'une fois ces remaniements achevés que l'évolution de l'indice d'aspérité traduit spécifiquement l'évolution de la morphologie de surface du sol ;

— d'une année à l'autre on n'a pas le même état structural de départ. En 1970-71, le bêchage effectué à une humidité élevée, a créé un état plus motteux qu'en 1971-72. Il en résulte, si l'on compare aux valeurs de la surface lisse, le maintien d'un indice élevé par rapport aux résultats de l'année suivante sur les mêmes parcelles (tabl. 5). Cette influence marquée de l'état structural rend assez difficile l'analyse du rôle des événements climatiques ;

— de même, l'influence des hétérogénéités d'état structural rend délicate la comparaison des comportements, appréciés par les variations de l'indice d'aspérité, entre les deux traitements. En effet, malgré toutes les précautions prises au moment du bêchage, celui-ci présente une certaine hétérogénéité qui peut se refléter dans les différences de comportement des répétitions au sein d'un même traitement. On note sur le tableau 5, en 1970-71, la variation entre les deux répétitions de la parcelle témoin : l'une très motteuse au départ, parvient, en fin d'observation, à un indice d'aspérité voisin de celui des parcelles fumier.

Dans l'ensemble, cependant, les valeurs les plus basses en fin d'observation et/ou les plus fortes diminutions de l'indice d'aspérité sont obtenues sur les parcelles témoin, ce qui recoupe les observations visuelles et confirme l'importance de la stabilité structurale sur la dégradation de la surface d'un sol sous l'action du climat.

Compte tenu des considérations précédentes, il n'est pas possible de mettre en évidence une corrélation nette entre les variations de l'indice et les caractéristiques du climat. Néanmoins on notera que :

— la diminution régulière de l'indice d'aspérimétrie s'amorce en 1970-71 après une période de gel (16 décembre au 7 janvier) qui a entraîné une forte augmentation de l'humidité du sol (fig. 1) ;

— l'année suivante, le sol n'a pratiquement jamais été gelé mais la diminution s'amorce après la première période très pluvieuse de cette campagne qui, à partir de cette date, sera beaucoup plus humide que la précédente (tabl. 2).

On retiendra donc :

— que les variations les plus significatives de cet indice traduisent un stade avancé de la battance ;

— que le déclenchement de cette diminution régulière semble plus lié à l'atteinte d'un certain excès d'eau dans les couches superficielles du sol qu'à une action directe des pluies.

3. — *Évolution de l'ensemble de la couche travaillée*

a) *Description.*

La figure 4 retrace l'évolution de la cote moyenne de la surface.

On constate une grande similitude entre les deux traitements et les deux années, la cote moyenne de la parcelle fumier baissant moins, au total, que celle du témoin.

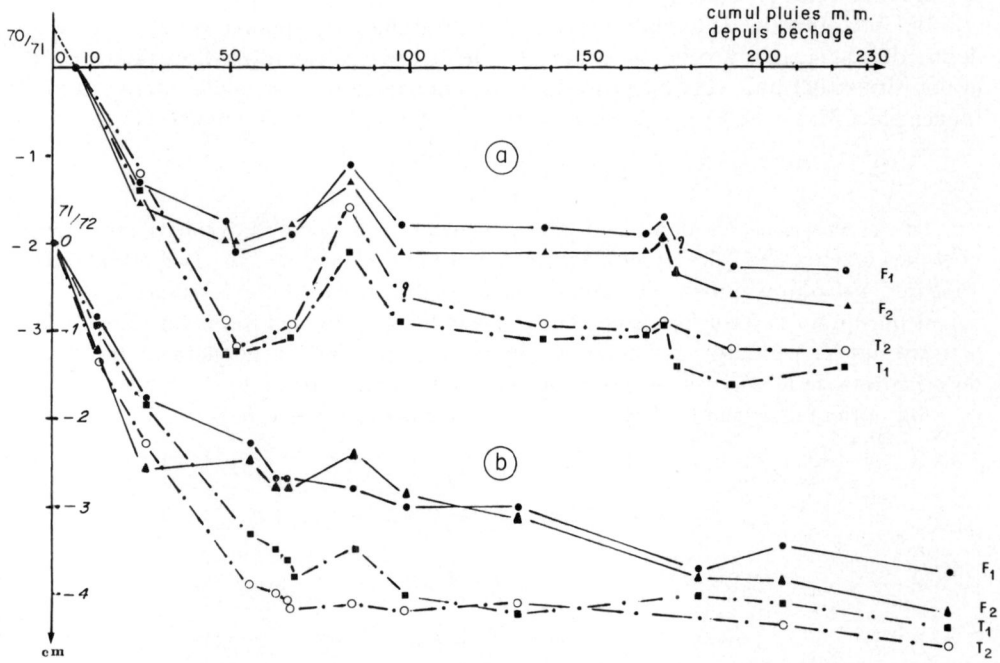


FIG. 4. — *Évolution de la cote moyenne de la surface en fonction des pluies*
Parcelle fumier F_1F_2
Parcelle témoin T_1T_2

L'évolution se caractérise par la succession de deux périodes :

— dans un premier temps, une diminution régulière, assez rapide, de la cote moyenne.

Cette période, qui se termine plus tôt pour les parcelles fumier, s'arrête aux dates suivantes :

Années	Date pour parcelle	
	Fumier	Témoin
1970-71	13-11	24-11
1971-72	19-11	03-12

— ensuite, la cote moyenne se stabilise, sa décroissance est très lente. En 1970-71, le profil semble avoir atteint son équilibre à la fin des observations.

On note par ailleurs, en 1970-71, des élévations brutales et temporaires de la cote moyenne de surface, affectant sensiblement de la même façon les traitements Fumier et Témoin, et, en leur sein, chacune des répétitions (elles correspondent à des gels).

La variation de cote moyenne de la surface peut s'exprimer en termes de porosité structurale, les pressions mises en jeu n'étant pas susceptibles d'affecter la porosité texturale (FAURE et FIÈS, 1972).

Si l'on admet que le fond du travail est resté stable, on rapporte alors l'évolution de la cote de surface à celle de la porosité de la couche travaillée. L'évaluation de la porosité structurale (Ps) est possible si l'on connaît la densité apparente du matériau en place (da) et la densité texturale (dt) du matériau à même humidité. On a alors :

$$Ps = 100 \left(1 - \frac{da}{dt}\right).$$

On a déterminé les densités texturales sèches des deux matériaux, ainsi que quelques valeurs de la densité apparente de sol humide en place par la méthode des anneaux. En toute rigueur, ces grandeurs ne peuvent être intégrées dans le même calcul puisqu'un certain gonflement peut avoir lieu à l'humectation. La texture de la terre des 42 parcelles, à dominante limoneuse, entraîne un gonflement faible et on acceptera de le négliger, la précision recherchée étant faible.

On obtient les valeurs moyennes reportées dans le tableau 6.

TABLEAU 6

Estimation et variation de la porosité structurale

Années	1970-71		1971-72	
Parcelles	Fumier	Témoin	Fumier	Témoin
Porosité structurale : (% du volume apparent)				
— juste après bêchage ...	31	30	38	29
— au terme des observations	22	18	26	14
Variation :				
— absolue	— 9	— 12	— 12	— 15
— relative (% de la porosité)	— 29	— 40	— 32	— 52

Ainsi, en quelques mois d'hiver, de 30 à 50 p. 100 de la porosité structurale créée par le travail automnal du sol ont disparu. On retrouve les observations souvent effectuées sur cette catégorie de sols.

b) *Relation avec le climat et les caractéristiques du sol.*

Au cours de la première période de décroissance, on note que celle-ci est presque proportionnelle aux pluies cumulées et que l'ensemble des points correspondant aux

deux années d'observation s'inscrivent sur la même courbe (fig. 5). On obtient la régression suivante, si l'on admet, en première approximation, une liaison linéaire, bien qu'une courbe de degré supérieur puisse être envisagée :

$$A = 0{,}061\ P + 0{,}33$$

avec A = abaissement de cote en cm ; P = pluviométrie cumulée depuis la première mesure en mm.

Le coefficient de corrélation est $r = 0{,}96$.

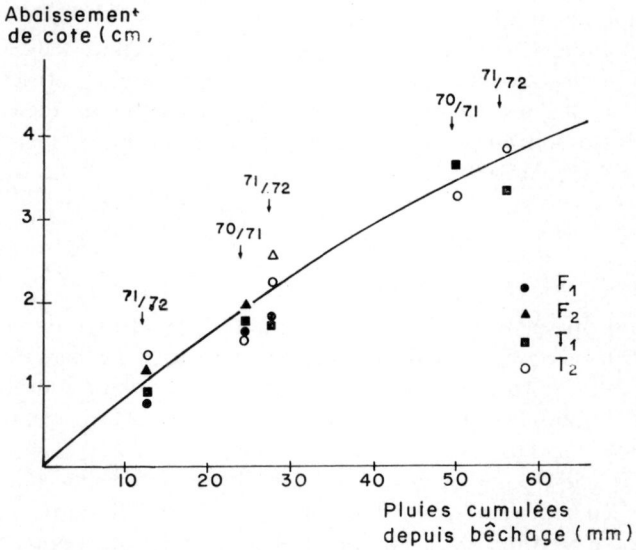


FIG. 5. — *Relation entre l'abaissement de la surface du sol après bêchage* (1) *et la pluviométrie*

Il est à noter que l'affaissement se poursuit jusqu'à des valeurs plus importantes en 1971-72 qu'en 1970-71, tout en suivant la même allure de variation en fonction des pluies. Ce fait est à rapprocher des différences d'état structural au départ : on avait une structure beaucoup plus fine au bêchage de l'automne 1971. Ceci a également pu provoquer une poursuite lente de l'évolution sur la parcelle fumier au cours de l'hiver 1971-72, restreignant ainsi l'effet d'un accroissement de stabilité structurale.

Il n'y a pas de corrélation nette entre la stabilisation de la cote de surface et l'apparition d'une phase d'évolution de la surface. Néanmoins on peut remarquer que cette stabilisation précède toujours la diminution régulière de l'indice d'aspérité.

Les élévations brusques de la surface correspondent à des périodes de gel : pics du 8-1-71 et du 1-3-71. Les deux pics observés sur une des répétitions de chaque parcelle le 6 janvier 1972 sont plus difficile à expliquer, peut être s'agit-il d'un biais général sur les points de repère de l'aspérimètre.

Le moment où les courbes des parcelles fumier et témoin se séparent correspond

(1) Sur ce graphique, pour 1970-71, on a ajouté aux abaissements mesurés à partir du 28-10, une valeur extrapolée de 0,4 cm pour représenter l'évolution depuis le bêchage (du 11-10).

à celui où la couche travaillée est à une humidité voisine de la capacité au champ dans chaque traitement et ceci, les deux années de suite.

Ainsi, pour la parcelle fumier, cette humidité correspond à un net ralentissement de l'affaissement, ce qui n'est pas le cas de la parcelle témoin. Pour les deux années, il suffit de 25 à 28 mm de pluie au-delà de ce moment pour obtenir en 7 à 10 jours sur les parcelles témoin l'affaissement presque définitif.

Nous retiendrons donc que :

— l'affaissement de la surface du sol s'effectue selon deux régimes : l'un très rapide, succède au travail et est de durée assez courte ; l'autre, de vitesse lente ou nulle, se déroule jusqu'à la fin de l'hiver.

— la loi d'affaissement au cours du premier de ces régimes semble indépendante du climat de l'année, de l'état structural initial, de la stabilité structurale : ces éléments interviennent donc comme condition du phénomène pour régler l'affaissement maximal atteint à son terme, sans modifier la relation affaissement-pluies. Celles-ci constituent le facteur actif.

4. — *Évolution de la stabilité structurale*

a) *Description.*

La figure 6 présente les valeurs de la stabilité structurale de la surface du sol exprimée en taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène ou à l'alcool. On a distingué les mottes et la terre sous-jacente pour tenir compte de l'éventuel accroissement de stabilité dû à la dessiccation de la surface (SEBILLOTTE, 1968 ; MONNIER et KONAN, 1968).

Pour la parcelle témoin, on note des valeurs basses et voisines (bien que systématiquement un peu supérieures pour les mottes) de la stabilité après les deux prétraitements : il n'y a pratiquement pas d'évolution au cours du temps.

Pour la parcelle fumier, il en va tout autrement. Il existe au départ une nette différence entre la stabilité des mottes (agrégats benzène) et celle de la terre située dessous ; cette différence se réduit d'abord brutalement avec le temps (elle a presque disparu le 13 novembre 1970), puis lentement (les deux séries sont identiques à partir du 18 décembre). On constate aussi, au démarrage, l'existence de populations de mottes n'ayant pas toutes la même augmentation de stabilité vis-à-vis de la terre qui leur est sous-jacente. Il importe de noter que cette terre ayant été bêchée le 11 octobre, les mottes de la surface, le 28 octobre, sont, pour l'essentiel, originaires de la masse du profil, et qu'on est donc en droit de supposer que leur stabilité structurale était alors identique à celle de la terre environnante [1].

Autrement dit, les différences constatées à la première mesure correspondent, au moins en partie, à un phénomène récent de dessiccation qui n'aurait joué que dans les parcelles riches en matière organique, et sans doute de façon assez hétérogène.

L'analyse d'agrégats après prétraitement alcool montre :

— une stabilité plus forte pour les mottes que pour la terre sous-jacente, et ce, sur les deux traitements, mais de façon plus nette pour le traitement fumier ;

[1] Aux hétérogénéités près liées à l'incorporation du fumier des années précédentes. Mais on peut douter qu'elles interviennent ici de façon prédominante car les mottes ont pour la plupart été fabriquées au bêchage.

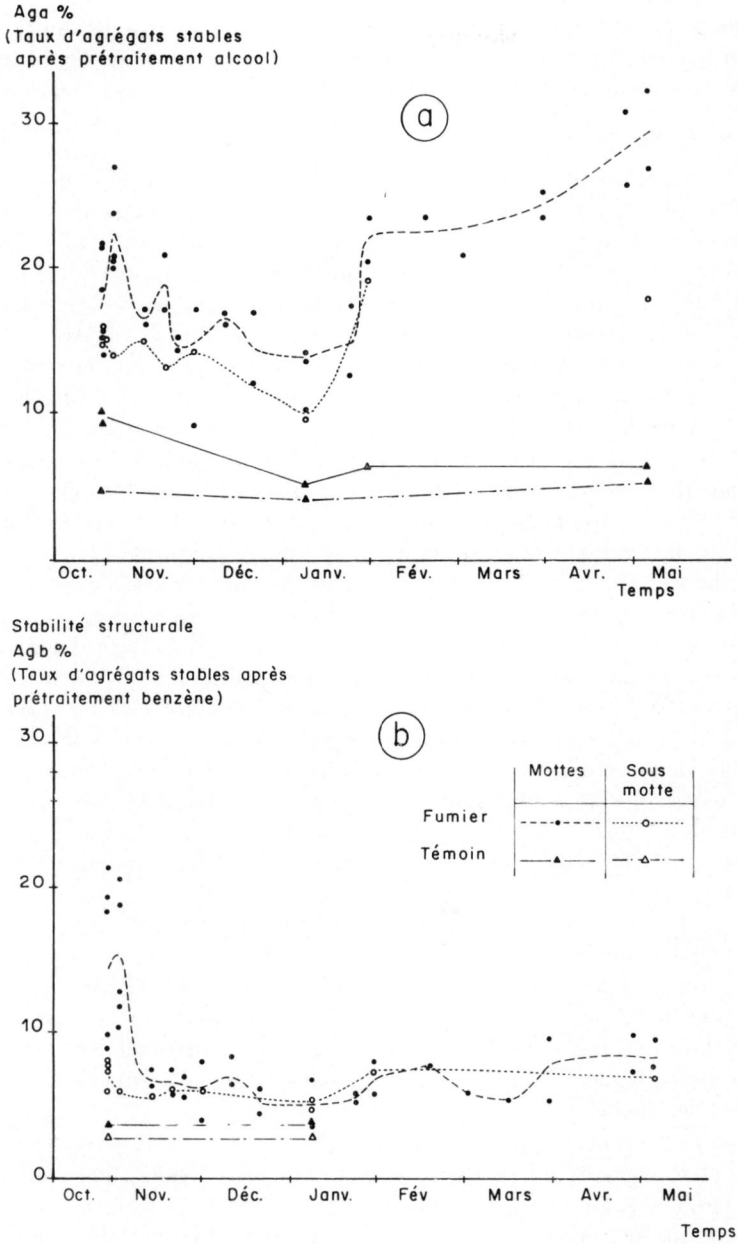


FIG. 6. — *Taux d'agrégats stables* (1970-1971) *après prétraitement alcool et après prétraitement benzène*

— des variations importantes dans le temps, notamment sur la parcelle fumier, où, après une diminution jusqu'en janvier, on enregistre une remontée considérable du taux d'agrégats-alcool, surtout pour les mottes.

On peut signaler que les valeurs obtenues pour la parcelle fumier recoupent celles données par MONNIER (1965) : ce dernier obtenait des taux Agb variant de 14 à 5 p. 100 d'août à décembre, et se stabilisant à ce bas niveau jusqu'en avril.

b) *Relation avec le climat et les autres caractéristiques du sol.*

La superposition des courbes d'humidité de la surface du sol et des taux d'agrégats montre que la période où la stabilité des mottes est nettement supérieure en parcelle fumier, correspond au moment où leur humidité est faible. La date du 13 novembre, à laquelle les courbes d'agrégats benzène, mottes et terre fine se rejoignent, est aussi celle où l'humidité des mottes atteint presque la capacité au champ. On retrouve ici les résultats obtenus en laboratoire par BOIFFIN (1976).

Cette différence d'humidité motte-terre fine existe aussi sur la parcelle témoin mais ne peut être reliée à une différence aussi importante de stabilité benzène. En outre, les valeurs de cette stabilité sont sensiblement les mêmes fin octobre et début janvier alors que les humidités diffèrent d'environ 20 points : on retrouve le fait déjà signalé (SEBILLOTTE, 1968 ; MONNIER et KONAN, 1968 ; BOIFFIN, 1976), que ce sont les constituants organiques qui semblent réagir à l'histoire hydrique du sol et, par suite, déterminent des variations de stabilité structurale.

La remontée du taux d'agrégats-alcool de fin janvier est d'une interprétation délicate. HÉNIN (1938) a montré qu'en exerçant des pressions sur la terre humide (pétrissage), on pouvait accroître sa cohésion et, par suite, le taux d'agrégats-alcool. Or, en sol limoneux, il est courant d'observer au champ une évolution structurale au sein des mottes à l'issue d'une dessiccation : le cœur des mottes devient plus compact et cohérent, la périphérie prenant un aspect feuilleté en couches grossièrement concentriques. Dans le cas étudié, 3 périodes de dessiccation ont pu intervenir, la principale à l'issue du bêchage, la seconde au cours du gel de janvier, la dernière fin janvier à l'issue du dégel. Or, l'érosion de la périphérie des mottes entraîne que les prélèvements correspondent de plus en plus à la partie centrale des mottes d'origine : telle pourrait être l'une des causes de la remontée des valeurs de AgA.

Quoi qu'il en soit de l'ensemble de ces fluctuations, on retiendra :

— qu'elles n'ont sans doute jamais joué un rôle déterminant dans le déclenchement même d'une phase marquante de la dégradation. En effet, d'une part elles sont presque inexistantes sur la parcelle témoin ; d'autre part, sur la parcelle fumier, l'accroissement marqué de stabilité structurale des mottes de surface a disparu lorsque la capacité au champ est atteinte dans la couche superficielle et que la phase II se déclenche ;

— que la parcelle fumier est toujours plus stable que la parcelle témoin. On retrouve l'effet attendu des matières organiques (MONNIER, 1965), mais ce n'est peut-être pas l'action de réduction de la mouillabilité de la terre qui prédomine ici dans l'amélioration globale de la résistance aux pluies. En effet, au cours de l'hiver, c'est surtout sur le taux d'agrégats alcool que les différences de stabilité structurale sont marquées : les mottes de la couche travaillée conserveraient donc une résistance supérieure à l'action de l'eau, mais aussi sans doute à l'écrasement, dans la parcelle fumier.

5. — *Evolution de l'humidité du sol dans la couche superficielle* (0-5 cm)

Cette évolution est retracée sur la figure 1. Elle a déjà été plusieurs fois citée. On notera :

— le parallélisme des courbes d'évolution qui traduit qu'en moyenne les parcelles se sont comportées de la même manière, en particulier en ce qui concerne le drainage ;

— l'excès d'eau au-dessus de la capacité au champ qui affecte une longue période durant l'hiver. L'assèchement de la surface ne se produit que lorsque l'évapotranspiration (Piche) devient nettement plus forte que les pluies (mars-avril). Ceci tend à prouver que la disparition de cette eau en excès (vis-à-vis de la capacité au champ) ne se fait pas, dans les conditions de l'expérience en 70-71, par drainage mais par évaporation ;

— qu'à l'automne, la parcelle témoin atteint en 1970-71, plus rapidement et définitivement une humidité supérieure à la capacité au champ. Au printemps de la même année, la parcelle fumier s'assèche plus vite que le témoin en surface. Ceci peut être rapproché d'une différence d'état structural (différence d'aspérimétrie) et peut expliquer aussi en partie la remontée de la stabilité alcool déjà notée.

6. — *L'action du gel*

Plusieurs périodes de gel sont intervenues au cours des deux campagnes. Il se trouve que les gels de janvier et mars 1971 ont été encadrés par des observations ; leur effet peut, ainsi, être analysé plus finement en référence aux travaux de Hénin et Robichet (1951).

Ces deux périodes de gel entraînent, on l'a déjà vu, des élévations de la cote moyenne du sol très voisines quelque soient le traitement et la répétition considérés. La différence d'élévation entre les deux dates peut provenir soit de la position relative des dates de gel du sol et d'observations, soit de différences d'action du gel. En effet, en janvier, l'observation s'est produite en fin de période de gel, alors que dans le 2e cas, elle a eu lieu tout au début : la croissance des cristaux de glace pouvait, alors, n'être pas complète.

Cependant, la figure 7 montre que les deux gels ne se sont pas établis de la même manière : le second s'est installé beaucoup plus rapidement ; il peut donc en être résulté pour une part la formation de cristaux de glace différents : en lentilles plutôt qu'en aiguilles d'une part, et une moindre alimentation des cristaux en aiguilles, seuls responsables d'une élévation notable de la surface d'autre part.

Les observations faites sur le terrain ont montré, en janvier, la présence de longues aiguilles de glace (plus d'un centimètre) exhaussant les mottes, ce qui n'a pas été observé en mars, peut-être à cause de l'absence de mottes encore nettement différenciées en surface. L'impossibilité d'observer les cristaux de glace en profondeur sans détruire la surface ne permet pas de vérification supplémentaire.

Une autre différence entre les deux périodes de gel est la variation de la cote moyenne entre les périodes pré- et post-gel. Ces deux gels se situent dans une phase de stabilisation de la cote moyenne de la surface, même en présence de fortes pluies. On est donc conduit à faire l'hypothèse que la chute de cote moyenne consécutive au deuxième gel (et non au premier) lui est imputable et que ces deux chutes de températures n'ont pas agi de la même manière sur la structure du sol.

On a déjà vu des différences dans la vitesse d'installation des températures négatives ; le tableau 7 souligne d'autres différences vis-à-vis des paramètres considérés comme importants pour leur influence sur l'état structural du sol.

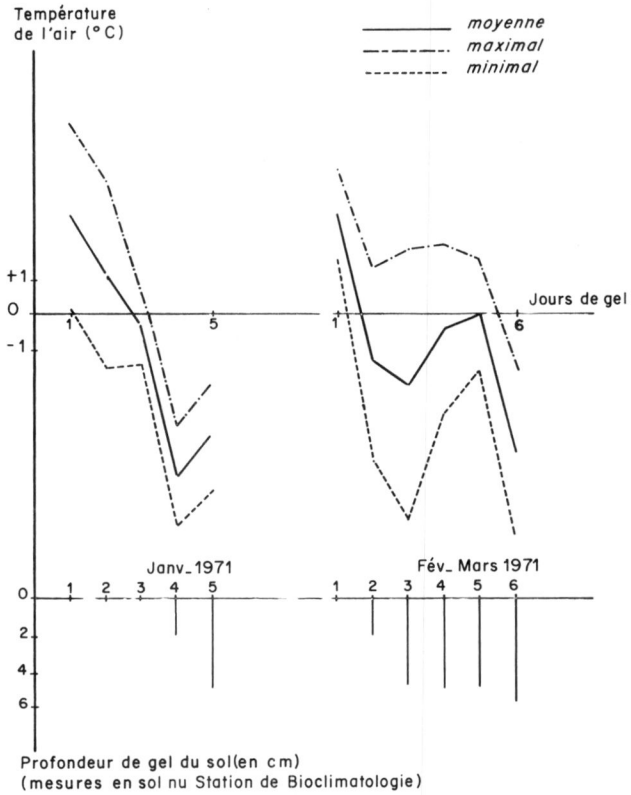


FIG. 7. — *Température de l'air et progression du gel dans le sol au cours du début des périodes de gel*

Deux différences importantes existent :

— un état structural de surface très différent ;

— une possibilité de dégel en surface, aux heures les plus chaudes en cours de 2e période et à son début (fig. 7), ce qui n'est pas le cas lors du premier gel pour lequel les températures maxima sont négatives à partir du 4e jour jusqu'au dégel. Les deux périodes de dégel sont comparables (vitesse de réchauffement assez rapide et quasi absence de précipitation).

L'état plus compact de la surface du sol et les différences d'établissement du gel suggèrent une formation nettement plus abondante de cristaux de glace en lentilles au cours du deuxième gel.

Comme le dégel rapide a dû entraîner un excès d'eau temporaire, les éléments structuraux fragmentés finement par ces cristaux ont pu se désagréger beaucoup plus en mars qu'en janvier. Les alternances gel-dégel de la surface dans le cas de la 2e période ont favorisé ce délitement des mottes présentes et la fabrication de minus-

cules fragments de terre dont la stabilité, en périodes, même courtes, d'excès d'eau locaux, est très faible. Ces différentes raisons peuvent rendre compte de l'effet plus dégradant du gel, apparemment moins sévère, au mois de mars.

TABLEAU 7

Principales caractéristiques des périodes de gel

Période	État structural initial et humidité avant gel	Durée gel (j)	Moyenne des minima de la période (°C)	Profondeur gelée max. du sol de référence (cm)	Dégel		Bilan de la période sur la porosité (1)
					Durée (j)	Valeur des *t* maxima (°C)	
24 décembre au 9 janvier	F : Surface très perforée sol rappuyé. $h = 32,1$ %	16	— 7	12	3	6 à 9	F = 0
	T : Surface peu colmatée, sol en partie pris en masse. $h = 26,5$ %						T = 0
28 février au 7 mars	F : Surface assez battue, profil état identique au 24-11. $h = 33,0$ %	8	— 6	9	2	6 à 9	F = — 1,4
	T : Surface très battue, profil état identique au 24-11. $h = 26,0$ %						T = — 1,5

(1) En points de porosité.

DISCUSSION GÉNÉRALE

Une remarque générale préalable s'impose : c'est la constance des phénomènes enregistrés et de leur évolution au cours des deux années successives et ceci alors que les quantités de pluie reçues et les bilans pluie-évaporation PICHE sont très différents au cours de la campagne d'observation. Le tableau ci-dessous donne les valeurs jusqu'au 15-3 :

Années	Pluies (mm)	Évaporation Piche (mm)
1970-71	176	185
1971-72	254	122

Ceci, ajouté à l'amplitude des différences de teneurs en matière organique des deux terres étudiées, permet de penser que la caractérisation de la battance qui résulte de ces travaux a une valeur très générale.

1. — *Relations climat-battance : les grands traits de l'évolution de la couche travaillée*

L'ensemble des différentes observations, menées de manière aussi indépendante que possible, montre que la battance n'est pas seulement le résultat direct de l'action des pluies. Certains de ses aspects dépendent de l'état hydrique du sol, et l'humidité à la capacité au champ joue un rôle particulier.

a) Tant que l'humidité du sol n'atteint pas, en surface (0-5 cm) et d'une manière durable la capacité au champ :

• la surface du sol se dégrade peu, l'action mécanique des gouttes de pluie se manifeste : arrachement à la surface des mottes, début de destruction des éléments structuraux de petite taille (terre fine). On est dans la phase I.

Cette constatation est en accord avec le fait que l'apparition de la phase II de la dégradation de la surface est assez corrélée aux pluies relativement intenses (plus de 2 ou 4 mm/h), sans que cela élimine le rôle propre de l'humidité de la surface elle-même liée au rapport pluie-évaporation.

• On observe dès le début un affaissement général de la surface du sol proportionnel aux quantités d'eau reçues, sans distinction d'efficacité du millimètre d'eau tombée entre les parcelles témoin et fumier ou entre les années. C'est donc une période de remaniement de l'ensemble de la couche travaillée.

En définitive, si pour l'évolution de l'état de la surface il semble raisonnable de privilégier, au cours de la phase I, l'action mécanique des gouttes de pluie, il n'en est pas de même pour l'évolution de la couche travaillée. Dans ce cas, on peut penser qu'au contraire, c'est l'effet d'humectation de la pluie qui prédomine.

b) Une fois l'humidité à la capacité au champ atteinte d'une manière durable dans l'horizon 0-5 cm :

• la dégradation de la surface s'accélère par :

— la formation de lit de boue à partir des éléments structuraux les plus gros,

— la disparition de l'individualisation des éléments structuraux de petite taille qui se soudent les uns aux autres.

On est dans les phases II et III au cours desquelles les pluies agissent en entretenant un excès d'eau qui favorise la naissance et le transport de boue plus ou moins fluide. Ceci est confirmé par le fait que le passage en phase III ne se produit qu'après l'apparition d'un très fort excès d'eau en surface du sol (0-5 cm).

• L'évolution de l'ensemble de la couche travaillée continue par :

— sur les *parcelles témoin* seulement, la poursuite de l'affaissement de la cote moyenne de la surface, toujours proportionnellement aux quantités de pluie reçues jusqu'à une valeur maximale comprise entre 50 et 70 mm d'eau.

— dans certaines conditions (2e année et surtout pour les parcelles fumier), un affaissement ultérieur très lent et très progressif de la cote moyenne qui semble encore proportionnel aux quantités de pluie reçues. Il s'agit d'un deuxième régime dans l'évolution de la cote moyenne.

Cette première série de constatations rend vaine la recherche d'une définition absolue d'une pluie battante puisque le comportement du sol est lié à son histoire hydrique et que la surface évolue selon des phases successives, qualitativement différentes, se déroulant toujours dans le même ordre.

Ceci est vrai avec les intensités de précipitations relevées au cours de l'expérience qui sont faibles. En fait sans que l'on puisse l'affirmer d'une manière générale, il est probable que pour des terres de ce type, il existe un seuil d'intensité qui, s'il est dépassé durant un temps suffisamment long (peut être 15 à 30 minutes), entraîne à la fin d'une pluie l'apparition en surface de la phase III [1]. Il s'agirait alors de ce que l'on pourrait qualifier de pluie battante et cette constatation n'est pas en désaccord avec l'ensemble de nos résultats.

Inversement, on voit que l'appellation courante de « sol battant » est très dépendante du climat local et résulte, en général, d'une comparaison entre des sols de propriétés structurales différentes. Cette dénomination est, de ce fait, contingente ; de plus, elle entraîne une confusion entre une propriété de la terre, la stabilité structurale, et un comportement, la battance. Ce dernier semble pouvoir être défini de façon très générale, par une succession d'étapes données que, selon les circonstances climatiques, son état initial, et ses propriétés physiques, un sol parcourra en parvenant ou non jusqu'à son terme et avec plus ou moins d'intensité.

2. — *Rôles de l'enrichissement en matière organique dans la battance d'une terre limoneuse*

Ce travail permet de cerner l'effet de l'enrichissement en matière organique d'une terre à faible stabilité structurale. Cet effet est triple :

— il entraîne une forte interaction entre le climat et la stabilité structurale de la terre. Des périodes sèches de durée assez courtes peuvent engendrer des différences, temporaires mais notables, de comportement entre les sols. Sur le plan de la pratique agricole, ces faits sont très importants et conditionnent souvent la réussite d'un semis en terre très battante ;

— il ralentit l'apparition des phases de dégradation sans en modifier la définition ni l'ordre ;

— il entraîne une réduction de l'intensité de dégradation tant en surface que dans l'épaisseur travaillée du sol.

Cette amélioration du comportement s'obtient alors que les humidités des parcelles fumier sont nettement supérieures à celles des parcelles témoin mais qu'elles varient, au cours du temps, de la même façon autour de la capacité au champ. Cette dernière valeur de l'humidité d'un sol est donc bien essentielle dans le phénomène de battance ; ce sont les excès d'eau (valeur et durée) qui déclenchent les phases les plus marquantes de la battance, la stabilité structurale ne faisant qu'en régler l'intensité.

Cette constatation est importante car il est ainsi possible de caractériser un comportement général de battance sous l'action de la pluie (succession des phases I, II et III), indépendamment de la stabilité structurale du matériau.

[1] Observation de l'un d'entre nous au cours d'orages sur le champ d'essai de Montluel (Ain).

3. — *Relations état structural-battance*

a) *Influence de l'état structural initial.*

Un dernier fait important se dégage de ces travaux : le rôle de l'état structural initial sur l'apparition des symptômes de dégradation et la liaison surface-profil dans leur évolution.

On a caractérisé l'état structural initial par la finesse des éléments structuraux et l'indice d'aspérimétrie. Ces caractères varient selon les traitements et les années ; par contre la porosité structurale obtenue par le bêchage est relativement constante.

Cet état initial du profil apparaît comme un facteur déterminant de la battance. Ceci est à rapprocher des travaux de BOIFFIN, SEBILLOTTE et DUBY (1975) opposant la stabilité structurale et la stabilité du lit de semence. C'est une raison de plus pour rendre vaine la définitition d'une pluie battante en tant qu'événement climatique isolé.

Mais le fait que l'état structural initial ne modifie pas l'ordre de déroulement des événements est essentiel et souligne bien que la battance est un phénomène provoqué par les événements climatiques, donc que le degré de battance atteint dépend de l'interaction climat-sol. Si donc il y a possibilité d'action par les techniques culturales, en réglant la taille des éléments structuraux, le résultat restera aléatoire : le choix d'un état structural initial suppose une analyse fréquentielle des événements climatiques.

De la même manière, l'état structural initial joue sur l'évolution de l'ensemble du profil travaillé. L'amplitude de la réduction de la porosité structurale à partir du bêchage dépend plus de cet état initial que des quantités de pluie dès que celles-ci dépassent un seuil relativement faible (moins de 100 mm). Mais l'état structural initial ne modifie pas la « loi » de réduction de la porosité structurale sous l'action de la pluie durant la première partie du phénomène.

L'influence de la structure initiale peut provenir de plusieurs phénomènes (souvent liés) :

— une action directe de la taille des éléments structuraux sur la vitesse de réduction de leur cohésion au cours de l'humectation générale du profil ;

— une différence initiale de cohésion de ces éléments structuraux en fonction de leur taille, de leur origine (fabrication antérieure au travail ou résultat du travail) et de leur mode de fabrication (influence des pressions : HÉNIN, 1938) ;

— une action indirecte de la taille des éléments structuraux sur l'infiltration superficielle de l'eau et donc sur l'humidité du sol par une action sur leur vitesse de désagrégation ;

— une différence d'architecture générale liée à la proportion des différentes classes de taille intervenant dans la transmission des pressions : une motte entourée de terre fine ne réagit probablement pas identiquement à une motte entourée d'autres mottes sous l'action d'une même pression exercée à la surface du profil.

Il ne faut pas oublier non plus le rôle de l'état structural de surface sur le type de cristaux pouvant se former lors d'un gel et leurs répercussions ultérieures sur l'état structural, en particulier sur la finesse des particules terreuses créées et leurs réactions à un éventuel excès d'eau lors du dégel.

b) *Esquisse d'un modèle pour l'évolution de la porosité structurale.*

L'allure générale de ce phénomène d'affaissement de la cote moyenne du profil travaillé et son analogie avec les premières phases d'une compression (HUTTER, 1966) conduisent à en donner une interprétation principalement mécanique.

Les forces et les résistances en jeu et leurs variations :

Les forces qui s'exercent dans le sens d'un affaissement de la surface sont :

— les effets de chocs des pluies, liés à leur intensité,

— l'accroissement de poids de la couche travaillée lors de son humectation progressive.

Les résistances à cet affaissement sont :

— la cohésion [1] des fragments terreux de la terre. Celle-ci diminue lorsqu'il y a humectation et l'on pense qu'il s'agit du mécanisme déterminant dans l'affaissement général du profil sous l'action des forces précédentes ;

— la résistance des éléments structuraux à la dégradation sous l'action de l'eau, en particulier dans le cas d'excès d'eau. La stabilité structurale des matériaux recouvre d'une part, la valeur de la cohésion à l'état humide très corrélée aux résultats du test à l'alcool (MONNIER, 1965 et CONCARET, 1967) et la résistance à l'éclatement des éléments structuraux par diminution de leur mouillabilité (test au benzène).

La diminution de stabilité structurale au cours de l'humectation est considérée comme très secondaire dans l'évolution globale du profil ;

— la cohésion générale de l'ensemble du profil qui, elle, croît avec la coalescence progressive des éléments structuraux. Il est probable que cette augmentation se réalise de façon discontinue.

La décomposition de ces diverses forces et résistances varie en chaque point du profil et au cours du temps puisque l'humectation se fait progressivement à partir de la surface.

Lorsque le profil est, en son entier, à la capacité au champ, l'essentiel (voir plus loin) de la diminution de cohésion des éléments structuraux est obtenue.

Les niveaux d'affaissement obtenus à l'issue des deux régimes constatés pour ce phénomène traduisent donc des équilibres assez stables : les énergies supportées par la couche travaillée sont équilibrées par la « cohésion » générale du profil.

Les comportements structuraux supposés.

Dans ses travaux, HUTTER (1966) décrit une série de comportements successifs des éléments structuraux sous l'action de pressions croissantes. Mais son matériau était homogène et de petit calibre (inférieur à 2 mm). On doit au contraire prendre ici en compte l'hétérogénéité de la structure initiale et par là même, comme on l'a déjà souligné, des résistances des éléments structuraux.

[1] Entendue comme une résultante « de la fréquence et de la résistance des liaisons établies entre les particules élémentaires » (HÉNIN *et al.*, 1969). On doit alors l'envisager respectivement pour les éléments structuraux et pour l'ensemble de la couche travaillée. L'emploi de ce terme — et sa définition physique — sont donc relativement imprécis. Une étude mécanique plus fine devrait reposer sur des concepts physiques mieux définis.

On envisage donc deux séries d'éléments structuraux aux comportements et donc aux rôles très différents dans ce remaniement général qui permet l'affaissement de la surface :

— les grosses mottes (M_2) qui vont, sans déformation importante, se redistribuer les unes par rapport aux autres, cette redistribution étant supposée engendrer *l'essentiel* de la perte de porosité structurale constatée globalement ;

— la terre fine (T) et les petites mottes (M_1) qui se déformeront ou (et) se désagrégeront, ces processus *conditionnant* les mouvements des éléments plus importants.

Au cours du premier régime d'affaissement, les pluies entraînent, suivant la même « loi » linéaire, l'abaissement de la cote, quelque soit le matériau, jusqu'à un point final qui, lui, dépend de la stabilité structurale, des propriétés mécaniques du sol et du rapport $\frac{T + M_1}{M_2}$. Ce qui explique les positions relatives des deux traitements et pour chacune des deux campagnes.

Au cours du second régime, on peut penser que ce sont d'autres mécanismes qui jouent qui exigeraient une longue période d'excès d'eau : par exemple une certaine prise en masse des éléments fins persistant dans les parcelles fumier.

On ne peut transposer directement les résultats de l'affaissement de la cote moyenne en termes de porosité structurale. Cependant les valeurs obtenues sont, pour la porosité structurale finale, en accord avec les mécanismes supputés. En effet, la stabilité structurale supérieure des parcelles-fumier entraîne par rapport aux parcelles-témoin, le maintien d'un nombre supérieur de petites mottes et de particules de terre fine sous forme isolée et donc un accroissement de la porosité structurale. C'est un phénomène de ce genre qui expliquerait qu'à une grande quantité de terre fine initiale en 1971-72 corresponde une porosité structurale finale supérieure, cette année-là, à celle de la campagne précédente, malgré une quantité de pluie reçue beaucoup plus forte.

Pour le témoin, au contraire, cette terre fine plus abondante entraîne par son écrasement et (ou) sa désagrégation, une variation de volume non totalement négligeable et donc une certaine perte supplémentaire de porosité structurale la deuxième année.

Formulation mathématique de la variation de cote.

On peut synthétiser ces phénomènes sous la forme suivante :

$$H_1 = H_0 - \alpha\, Q \qquad \text{pour } Q < Qi \ \text{1er régime}$$

avec $Qi = f\left(St, \frac{T + M_1}{M_2}, C\right)$

$$H_2 = H_1 - \beta\, Q \qquad \text{pour } Q > Qi \ \text{2e régime}$$

avec $\beta = K\, g\,(St)$

K est toujours faible et peu différent de zéro si Si est faible ; H_0, H_1, H_2 sont les cotes moyennes de la surface à partir du fond de la couche travaillée ; α, β et K des coefficients positifs ; Q, les quantités de pluie cumulées après bêchage ; St, la stabilité de la terre considérée ; C, sa cohésion à l'état humide.

La fonction f est croissante avec $\frac{T + M_1}{M_2}$ et décroissante avec St et C comme

la fonction g. Il est probable qu'il faudrait, en outre, imposer à Qi d'être supérieure ou égale à Qo, quantité d'eau permettant dans les conditions climatiques ambiantes d'amener le profil à une humidité voisine de la capacité au champ.

Reçu pour publication en juin 1976.

SUMMARY

CLIMATE, STRUCTURE STABILITY AND STRUCTURE WEATHERING. ATTEMPT TO ANALYSE A SOIL BEHAVIOUR IN THE FIELD

Visual observations and simple measurement devices allowed us to follow the structure evolution of two plots showing the same loamy texture, but differing by their content in organic matter, during winter.

Soil surface is weathered acording to successive stages, the order and definition of which are not modified by the variations of the climate, initial structure or structure stability of soil. The whole tilled layer gradually collapses under the action of rains at first rapidly after digging and then very slowly.

Various correlations appear between the climatic events and the development of these processes. The direct action of rains is not the only one involved. The moistening effect and the role of water excess seem to be decisive. The concept of beating rain seems little founded in the environment studied.

The effect of a soil enrichment in organic matter consists in slowing down the surface weathering, limiting its intensity and restricting the altering range of the tilled layer without modifying the general trend of these evolutions.

Lastly the role of the initial structure and the evolution mechanism of the macroporosity are discussed. A synthetic formulation is suggested.

ZUSAMMENFASSUNG

KLIMA, STRUKTURFESTIGKEIT UND ABPLATTUNG. VERSUCH ZUR ANALYSE EINES BODENVERHALTENS IM FELD

Visuelle Beobachtungen und einfache Messinstrumenten ermöglichten die Untersuchung der Strukturentwicklung von zwei Parzellen, die die selbe Schlammstruktur besitzen, aber nicht ebenso reich an organischen Substanzen sind, während des Winters.

Die Bodenoberfläche verwittert in aufeinanderfolgenden Stufen, deren Reihenfolge und Definition durch die Schwankungen des Klimas, des Anfangsstrukturzustandes oder der Strukturfestigkeit des Bodens nicht verändert sind. Die gesamte bearbeitete Schicht senkt sich fortschreitend wegen des Regens, zunächst schnell in Folge des Umgrabens und dann sehr langsam.

Verschiedene Korrelationen zwischen den Klimaereignissen und der Entwicklung dieser Prozessen erscheinen. Die direkte Wirkung des Regens ist nicht der einzige Faktor. Der Anfeuchtungseffekt und die Rolle des Wasserüberschusses scheinen ausschlaggebend zu sein. Der Begriff von Abplattung scheint wenig berechtigt in der studierten Umwelt.

Die Wirkung einer Bodenanreicherung as organischen Substanzen besteht in einer Verlangsamung der Oberflächeverwitterung, der Bregenzung ihrer Stärke und in der Beschränkung der Aufarbeitungsweite der bearbeiteten Schicht, ohne den Gesamtverlauf dieser Entwicklungen zu ändern.

Leitzlich werden die Rolle des Anfangsstrukturzustandes und der Entwicklungsablauf der Strukturporosität erlaütert. Eine synthetische Formulierung ist vergeschlagen.

РЕЗЮМЕ

Климат, прочность и непрочность структуры. — Опыт анализа поведения почвы в поле.

Ж. БУАФФЕН, М. СЕБИЙОТТ.

При помощи визуальных наблюдений и простых измерительных приборов прослежена была зимой эволюция структуры почвы двух делянок одинакового глинистого состава, но с различным содержанием органического вещества.

Деградация поверхности почвы происходила по последовательным фазам, на порядок и сущность которых не имели влияния изменения климатических условий, первоначального состояния структуры почвы, или прочности этой структуры. Весь обработанный слой прогрессивно оседал под влиянием дождей и оседание это протекало сперва очень быстро, после вскапывания, затем очень медленно.

Между климатическими событиями и протеканием этого процесса существуют некоторые корреляции и прямое действие дождей не является только одной его причиной. Эффект увлажнения и роль избытка влаги имеют первенствующее значение, но сила дождя не оказывает никакого влияния в изучавшейся среде.

Эффект обогащения почвы органическим вешеством состоял в замедлении деградации ее поверхности, ограничении интенсивности этой деградации и уменьшении амплитуды переустройства обработанного слоя, без изменения общего темпа этих эволюций. В конце работы обсуждаются роль первоначального состояния структуры и механизма ее порозности, и предлагаются синтетические формулы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Boiffin J., 1976. Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann. agron.*, **27**, (sous presse).

Boiffin J., Sebillotte M., Duby Camille, 1975. Influence des conditions écologiques et de l'histoire culturale sur le rendement du maïs-grain. Analyse de 8 campagnes sur un essai de longue durée. *Ann. agron.*, **26** (5), 555-591.

Concaret J., 1967. Étude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact des solutions aqueuses. *Ann. agron.*, **18** (1), 65-90.

Faure A., Fiès J.-C., 1972. Étude expérimentale de la sensibilité au compactage de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Ann. agron.*, **23** (3), 317-332.

Fournier F., 1960. *Climat et érosion.* Thèse Presses Universitaires de France.

Hénin S., 1938. *Étude physicochimique de la stabilité structurale des terres.* Thèse Paris.

Hénin S., Robichet C., 1951. Mécanismes du soulèvement du sol sous l'influence du gel. *C. R. Acad. Sc.*, **232**, 23-58.

Hénin S. *et al.*, 1969. *Le profil cultural.* 2e édition. Société d'Éditions des Ingénieurs agricoles, Paris.

Hutter W., 1966. Action des compressions sur la structure d'un sol. *Ann. agron.*, **17** (1), 37-52.

Kheyrabi D., Monnier G., 1968. Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.

Monnier G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Paris.

MONNIER G., KONAN L., 1968. Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (5), 541-551.

SEBILLOTTE M., 1966. Histoire d'une motte de terre. *Le Figaro agricole*, mars 1966.

SEBILLOTTE M., 1968. Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. *Ann. agron.*, **19** (4), 403-414.

SMITH D. D., WISCHMEIER W. H., 1957. Factors affecting sheet and rill erosion. *Amer. Geophys. Union.*, **38**, 889-896.

WISCHMEIER W. H., SMITH D. D., 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Amer. Geophys. Union.*, **39**, 285-291.

Ann. agron., 1976, **27** (3), 327-332.

ASSIMILATION NETTE, UTILISATION DE L'EAU ET MICROCLIMATOLOGIE D'UN CHAMP DE MAÏS

VII. — Variations du rapport des énergies rouge sombre-rouge clair

R. BONHOMME et C. VARLET GRANCHER*

Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques des Antilles et de la Guyane, I. N. R. A.,
Petit-Bourg (Guadeloupe)

RÉSUMÉ

La variation du rapport des énergies rouge sombre-rouge clair (R) est faible sur un plan horizontal au-dessus d'une culture dans les conditions naturelles (R varie de 0,7 à 0,8). Par contre l'inclinaison de la surface accroît beaucoup ce rapport, les radiations réfléchies par la végétation étant enrichies en proche infrarouge. Dans le couvert végétal, R prend également des valeurs très élevées dans les zones à l'ombre.

I. — INTRODUCTION

Les notions de physiologie végétale relatives à l'action de la lumière sur les plantes se sont précisées ces dernières années. L'action des facteurs du milieu sur l'assimilation nette du gaz carbonique, grâce à la photosynthèse, est maintenant mieux connue tant aux niveaux biochimique et cellulaire qu'à ceux de la feuille et du couvert végétal. Par ailleurs, le phototropisme n'est plus le seul phénomène de morphogénèse connu, les découvertes relatives au phytochrome ouvrent de nouvelles perspectives. Bien que le comportement de ce pigment dans les conditions naturelles (fortes énergies, mélange de radiations) ne soit pas bien connu, il est certain que la lumière modifie l'équilibre entre deux formes : une forme P_{660} (dont le maximum d'absorption est 660 nm) qui, sous l'action de la lumière rouge clair, se convertit en une forme P_{730} (maximum d'absorption à 730 nm) qui absorbe les radiations rouge sombre.

* Adresse actuelle : C. N. R. A., Route de St Cyr 78000 Versailles.

Il nous a donc paru intéressant de regrouper les données de composition spectrale que nous avons collectées pour différentes études afin de présenter les variations du rapport des énergies rouge sombre-rouge clair.

2. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les mesures des éclairements énergétiques monochromatiques E sont faites à l'aide d'un spectroradiomètre portatif ISCO. Compte tenu de la bande passante assez large de l'instrument (15 nm dans le visible et 30 nm dans le proche infrarouge), et de la faible précision de l'échelle des longueurs d'onde, nous avons pris comme valeur d'éclairement à 660 nm (E_{660}) la moyenne des deux mesures faites aux repères 650 et 675 nm et la moyenne des mesures à 725 et 750 nm pour E_{730} ; le rapport E_{730}/E_{660} est noté R.

Au-dessus du couvert végétal les données ont été obtenues à Versailles au cours des mois de juin, juillet, août des années 1969, 1970, 1971. La mesure des énergies fournies par le ciel seul est réalisée à l'aide d'un cache ombrant la surface réceptrice.

La culture de maïs F 7 × Ep 1 est semée à 90 000 pieds par hectare. Son développement végétatif est caractérisé par son indice foliaire (m^2 de feuilles/m^2 de sol) mesuré par planimétrage direct sur trois parcelles de 1 m^2.

Les éclairements reçus sur des plans inclinés, pour 660 et 730 nm, sont estimés à l'aide d'une méthodologie analogue à celle employée par ailleurs (VARLET GRANCHER, 1975) pour l'étude des énergies globales ou utiles à la photosynthèse. Compte tenu du bon accord obtenu entre estimations et mesures pour les domaines spectraux précédents, la validité de cette méthode pour les bandes spectrales rouge ou proche-infrarouge est certainement satisfaisante.

3. — RÉSULTATS

3. 1. — *Variations du rapport* $R = E_{730}/E_{660}$ *sur un plan horizontal au-dessus de la culture*

Sur l'ensemble des mesures effectuées à différentes heures de la journée par ciel clair, il n'est pas possible de mettre en évidence de différences significatives entre les valeurs de R_G dans le rayonnement global (tabl. 1). Le rayonnement diffusé par le ciel est plus riche en rayonnements de courte longueur d'onde ; ceci peut créer des

TABLEAU I

Valeurs de $R = E_{730}/E_{660}$ *sur un plan horizontal dans les conditions naturelles*

	Valeur moyenne	Erreur-type sur R	Nombre de mesures
Rayonnement global (ciel clair)	$R_G = 0{,}75$	0,05	100
Rayonnement diffus (ciel clair)	$R_d = 0{,}66$	0,06	45
Rayonnement global (ciel couvert)	$R_g = 0{,}81$	0,10	49
Rayonnement solaire extra-terrestre (THEKAEKARA, 1973)	$R_e = 0{,}868$		

conditions particulières : valeurs de R_d plus faibles dans des lieux ne recevant pas le rayonnement solaire direct. Par ciel couvert, les valeurs de R_g sont sensiblement plus élevées que par ciel clair sans que les différences soient significatives.

Si l'on compare ces différentes valeurs de R à celles du rayonnement solaire extra-terrestre (THEKAEKARA, 1973), on peut en conclure que les variations obtenues sur un plan horizontal dans les conditions naturelles, restent faibles.

3. 2. — *Variations du rapport R sur un plan variable au-dessus de la culture*

Par rapport à un plan horizontal, une surface inclinée reçoit :

— des rayons provenant du soleil,
— de l'énergie diffusée par la voûte du ciel,
— de l'énergie réfléchie par le sol et la culture environnants.

Dans le rayonnement solaire direct, le rapport R est identique sur une surface horizontale ou inclinée. Bien que la voûte céleste n'ait pas une luminance isotrope, on peut penser que les variations de ce rapport restent faibles pour différentes zones de ciel.

Par contre, les énergies réfléchies par le sol ou la culture ont des valeurs de R très différentes de celles des rayonnements solaires directs ou diffus, compte tenu de la forte absorption des radiations rouges par la chlorophylle des plantes et de la très faible absorption dans le proche infrarouge (VARLET GRANCHER et BONHOMME, 1971).

Il en résulte que les valeurs de R vont dépendre fortement de la part d'énergie réfléchie reçue, et donc de l'orientation du plan.

3. 2.1. *Valeurs de R sur une surface horizontale dirigée vers le bas.*

Si l'on se reporte aux mesures du facteur de réflexion monochromatique du sol ou d'une culture (VARLET GRANCHER, 1974), on remarque que :

— pour le sol nu, R_r est voisin de 1,0 et varie peu avec l'humidité du sol et la position du soleil,
— pour la culture de maïs, on a une augmentation très forte de R_r avec l'indice foliaire, particulièrement pour les faibles indices (tabl. 2).

TABLEAU 2

Valeurs de $R = E_{730}/E_{660}$
sur une surface horizontale dirigée vers une culture de maïs
Ciel clair : r_{730} et r_{660} : facteurs de réflexion monochromatique pour les longueurs d'onde 730 et 660 nm

Indice foliaire de la culture	0	0,6	1,2	2,6
r_{730}/r_{660}	1,2	2,2	8,0	10,0
$R_r = R_G \times r_{730}/r_{660}$	1,0	1,8	6,5	8,1

3. 2.2. *Valeurs de R sur un plan variable.*

Sur une surface variable placée au-dessus d'un couvert végétal à un stade donné, la valeur de R dépend de l'importance relative des rayonnements solaires incidents (direct et diffus) et des rayonnements solaires réfléchis ; R varie donc entre R_r et R_g selon l'inclinaison du plan.

Par un ciel couvert on a à la fois isotropie des rayonnements incidents et réfléchis ; l'énergie sur un plan d'inclinaison i est : $D \cos^2 (i/2)$, D étant l'énergie reçue sur un plan horizontal (ROBINSON, 1966). On peut donc évaluer R en supposant l'égalité des rapports de luminance pour les bandes spectrales 730 et 660 nm en chaque point de la voûte du ciel :

$$R = R_g \cdot \cos^2 (i/2) + R_r[1 - \cos^2 (i/2)].$$

Par exemple, pour une surface verticale ($i = 90°$), R est de 0,9 sur un sol nu et de 4,4 sur une culture. Ces évaluations sont confirmées par la valeur R = 1,0 obtenue sur un plan vertical placé au-dessus d'un très jeune couvert de maïs (VARLET GRANCHER, 1975).

Par ciel clair, et compte tenu des mêmes hypothèses sur les luminances du ciel, on peut appliquer une loi identique en combinant les valeurs de R des rayonnements solaires global et diffus :

$$R = \left\{ R_d \cdot D_i + [(R_g - R_d) \cdot (G_i - D_i)] \, [\cos^2 (i/2)]/G_i \right\} + R_r[1 - \cos^2 (i/2)]$$

G_i et D_i étant les énergies globales et diffuses reçues sur un plan d'inclinaison i. La gamme de variation de R est un peu plus grande que dans le cas du ciel couvert étant donné les faibles valeurs de R_d.

3. 3. — *Variations du rapport R dans la culture*

Dans une culture, la principale cause d'hétérogénéité dans les éclairements est la présence de zones au soleil et de zones ombrées. Des différences dans les compositions spectrales sont associées à ces différences dans les énergies (VARLET GRANCHER et BONHOMME, 1971) ; il en résulte que les valeurs de R vont être très dissemblables dans les « taches de soleil » ou dans les zones ombrées.

3. 3.1. *Cas des taches de soleil.*

Dans les couches supérieures du couvert végétal, la composition spectrale dans les taches de soleil est peu différente de celle du rayonnement solaire direct. On a ensuite dans le profil un léger appauvrissement en radiations de courte longueur d'onde (réduction du diffus du ciel) et un enrichissement en proche infrarouge (lumière rediffusée par les feuilles environnantes). D'une valeur voisine de 1,1, près du sommet, le rapport prend ensuite dans le profil une valeur moyenne de 1,2 avec des extrêmes de 1,0 à 1,4.

3. 3.2. *Cas des zones ombrées.*

Les modifications sont dans ce cas très importantes : réduction du visible et enrichissement en proche infrarouge dus aux absorptions et diffusions foliaires. Il en

résulte que le rapport E_{730}/E_{660} est très différent du cas précédent. Dans les couches supérieures, R est voisin de 1,25 puis prend dans le profil une valeur moyenne de 3,3 avec des extrêmes très variables de 2,5 à 9.

3. 3.3. *Influence de l'orientation.*

En modifiant la part des rayonnements solaires directs par rapport à celle des rayonnements réfléchis ou transmis par les feuilles, l'orientation modifie le rapport R. Une estimation simple en fonction de l'inclinaison *i* n'est pas possible, et seule la mesure directe des énergies rouge et proche infrarouge permet de situer R entre les limites extrêmes citées ci-dessus.

4. — CONCLUSION

Bien que peu d'études portent sur le rapport R, nos données sont en bon accord avec les évaluations faites sur les graphiques de différentes mesures de la composition spectrale de la lumière dans les conditions naturelles, sur un plan horizontal : HULL (1954), ROBERTSON (1966). A cause du peu de mesures obtenues pour des hauteurs de soleil faibles, l'augmentation relative en radiations proche infrarouge, signalée par SINCLAIR et LEMON (1973) à l'aube et au crépuscule, n'a pu être observée.

Les variations très importantes du rapport proche infrarouge/rouge dans une culture ont déjà été montrées, au moins de façon qualitative : YOCUM *et al.* (1964), FEDERER et TANNER (1966). Par contre, le résultat le plus original est le fait, que sur une surface au sommet d'un couvert végétal, on peut avoir des modifications très importantes de R avec l'inclinaison. Il en résulte qu'un organe végétal en position axillaire est placé dans un équilibre de radiations très différent de celui en position apicale ; cette variation de R intervient même si la surface inclinée est soumise au rayonnement solaire direct.

La généralisation de ces résultats, obtenus dans des conditions bien particulières de lieu et de culture, doit être faite avec prudence. Il faut signaler cependant qu'en conditions de rayonnements solaires très différentes (Guadeloupe : 16°N), nous avons trouvé des valeurs très voisines : $R_G = 0{,}76$. D'autre part, les modifications de composition spectrale de la lumière réfléchie ou transmise qui sont la cause des fortes variations de R, sont analogues pour de nombreuses espèces végétales (GAUSMAN et ALLEN, 1973). On peut donc penser que les ordres de grandeur et les variations du rapport rouge sombre-rouge clair présentés ici ont un caractère assez général dans les conditions naturelles.

Reçu pour publication en juin 1976.

SUMMARY

NET ASSIMILATION, WATER USE AND MICROCLIMATE OF A MAIZE CANOPY.
VII. DISTRIBUTION OF THE RED AND FAR-RED RADIATION

The variation of the ratio between far-red and red radiation (R) on a horizontal surface above a crop in field conditions is not important : (R varies between 0,7 and 0,8). On the other hand the inclination of these surface leads to increase largely this ratio because of the far-red enrichment of the reflected light. Within the crop R is also very high in the shaded areas.

ZUSAMMENFASSUNG

NETTOASSIMILATION, NUTZUNG DES WASSERS UND MIKROKLIMA IN EINEM MAISFELD. VII.— ÄNDERUNGEN DES VERHÄLTNISSES VON DUNKELROTEN ZU HELLROTEN ENERGIEN

Die Änderung des Verhältnisses von dunkelroten zu hellroten Energien (R) ist schwach auf einer horizontalen Ebene über einer Kultur unter natürlichen Bedingungen (R variiert von 0,7 zu 0,8). Dagegen vergrössert die Flächeneigung diesen Verhältnis sehr, denn die durch die Vegetation zurückgeworfenen Strahlungen werden an nahem Infrarot angereichert. In der Pflanzendecke zeigt R auch sehr hohe Werte in den im Schatten befindlichen Zonen.

РЕЗЮМЕ

Чистое усвоение, использование влаги и микроклиматология кукурузного поля. — VII. Изменение соотношения между энергиями темно-красной и светло-красной.

Р. БОНОММ, К. ВАРЛЕ-ГРАНШЕ.

В природных условиях и в горизонтальном плане над культурой, соотношение между темно-красной и светло-красной энергиями (R) изменяетя мало (от 0,7 до 0,8). И, напротив, отношение это сильно увеличивается на поверхности с уклоном, ибо излучение отражающееся растительностью обогащается близким инфра-красным. Внутри растительного покрова значения R также сильно повышаются в затененных зонах.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FEDERER C. A., TANNER C. B., 1966. Spectral distribution of light in the forest. *Ecology* **47**, 555-560.

GAUSMAN H. W., ALLEN W. A., 1973. Optical parameters of leaves of 30 Plant Species. *Plant Physiol.*, **52** 57-62.

HULL J. N., 1954. The spectral distribution of radiation from sun and sky. *Illum. Eng. Soc. Trans.*, **19** 21-28.

ROBERTSON G. W., 1966. The light composition of solar and sky spectra available to plants. *Ecology*, **67**, 640-643.

ROBINSON N., 1966. *Solar Radiation.* Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 347 p.

SINCLAIR T. R., LEMON E. R., 1973. The distribution of 660 and 730 nm radiation in corn canopies. *Solar Energy*, **15**, 1, 89-97.

THEKAEKARA M. P., 1973. Solar Energy outside the Earth'atmosphere. *Solar Energy*, **14**, 2, 109-127,

VARLET GRANCHER C., BONHOMME R., 1971. Assimilation nette, utilisation de l eau et microclimatologie d'un champ de Maïs. III. Composition spectrale de la lumière dans la culture. *Ann. agron.*, **22** (5), 515-525.

VARLET GRANCHER C., 1974. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de Maïs. V. Quantité et qualité de la lumière solaire réfléchie. *Ann. agron.*, **25** (6), 797-810.

VARLET GRANCHER C., 1975. Variation et estimation de l'énergie d'origine solaire reçue sur des plans d'inclinaison et d'azimut variables. *Ann. agron.*, **26** (3), 245-264.

YOCUM C. S., ALLEN L. H., LEMON E. R., 1964. Photosynthesis under field conditions. VI. Solar Radiation Balance and photosynthetic efficiency. *Agron. J.*, **56**, 249-253.

Ann. agron., 1976, **27** (3), 333-342.

INFLUENCE DES FACTEURS DU MILIEU SUR L'ABSORPTION HYDRIQUE. ÉTUDE SUR TOMATE DÉCAPITÉE EN EXSUDATION

II. — Facteurs physiques et interactions avec la nutrition minérale

J. MORIZET et M. MINGEAU

avec la collaboration technique de Lucette Le Blevenec et H. Raynaud

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Clermont Ferrand, I. N. R. A.,
63100 Clermont Ferrand

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objet d'analyser l'influence de deux facteurs physiques du milieu sur l'absorption de l'eau par des plants de tomate : conditions climatiques des parties épigées et aération du milieu racinaire. Les observations portent sur les différents paramètres de l'exsudation de plantes décapitées.

L'importance du métabolisme racinaire vis-à-vis de l'absorption hydrique est soulignée et la transposition des résultats au transfert de l'eau dans une plante entière est discutée.

INTRODUCTION

Dans une publication précédente (Morizet et Mingeau, 1976), nous avons montré l'influence des facteurs nutritionnels sur l'absorption de l'eau et nous avons essayé d'expliciter les mécanismes mis en jeu.

Au cours de cette deuxième partie, nous étudierons les relations entre l'absorption hydrique et deux composantes de l'environnement physique de la plante :

— conditions climatiques des parties épigées,
— aération du milieu racinaire.

Nous rendrons compte également de leurs interactions avec la nutrition minérale.

Nous nous appuierons, comme précédemment, sur les caractéristiques de l'exsu-

dation de plantes décapitées, pour contrôler et expliquer les relations observées. Compte tenu de la méthodologie utilisée, nous rappelons qu'il s'agit essentiellement ici de l'évolution du transfert « actif » de l'eau à travers les racines.

A notre connaissance, aucun compte-rendu similaire n'a été effectué concernant l'action des conditions climatiques ; par contre, les conséquences d'une asphyxie du milieu racinaire ont déjà été étudiées (KRAMER, 1969 ; WILLEY, 1970) ; nous nous bornerons donc à compléter et analyser les données globales acquises.

I. — MATÉRIEL VÉGÉTAL ET MÉTHODES

Le matériel végétal, tomates *Marmande*, la technique culturale sur sable avec solution nutritive T_1, les contrôles comme dans les essais : alimentation totalement carencée ou carencée en azote, sont décrits par ailleurs (MORIZET et MINGEAU, 1976).

Protocoles expérimentaux

Suivant le facteur étudié, les essais ont été menés différemment en profitant pour l'un, des variations aléatoires du climat et en imposant pour l'autre, un ennoyage contrôlé du système racinaire.

1. *Conditions climatiques des parties épigées.*

Aucun traitement n'est prévu. Les plantes sont laissées sur solution nutritive complète T_1. Les températures moyennes et l'insolation (serre ou extérieur suivant le cas) sont notées quotidiennement.

2. *Aération du milieu racinaire.*

Les traitements sont les suivants :

— traitement T : système racinaire normalement aéré;
— traitement TE : système racinaire complètement immergé.

L' « ennoyage » est provoqué à 8 h 30 après décapitation des plantes par arrêt du drainage et saturation complète des pots de culture jusqu'à la surface. Il est supprimé à 14 h 15.

Pour ces deux séries d'essais, les études d'interaction avec la nutrition minérale sont réalisées en combinant aux traitements, décrits des traitements avec alimentation carencée.

— *Conditions climatiques.*

Arrosage avec de l'eau déminéralisée (+ 30 g de PEG 4000 par litre) (traitement O) ou avec la solution N_0 (traitement N_0) (MORIZET et MINGEAU, 1976) 15 heures avant la décapitation.

— *Aération du système racinaire.*

Arrosage avec la solution N_0 durant deux jours, ce qui donne les traitements supplémentaires suivants :

— N_0, carence azotée sans ennoyage,
— N_0E, carence azotée avec ennoyage.

Ajoutons que toutes les données rapportées par la suite sont des moyennes calculées sur trois plantes.

II. — RÉSULTATS

1. — *Action des conditions climatiques pendant les jours précédant le contrôle*

Au cours de juillet et début août 1973, quatre séries de mesures sont effectuées sur un lot de tomates semées à la mi-mai et repiquées sur sable le 18 juin. Avant les deux premiers contrôles (19 et 24 juillet), les plantes sont à l'air libre (abri mobile)

puis la température ayant notablement chuté, elles sont transférées dans la serre, le 25 au matin.

Les données concernant l'exsudation (fig. 1) sont très étroitement corrélées avec les conditions climatiques précédant immédiatement les opérations de décapitation et de contrôles (tabl. 1). L'ampleur des variations est telle que l'on peut considérer les différences comme significatives même si, les observations s'étant étalées sur une quinzaine de jours, l'âge de la plante peut intervenir.

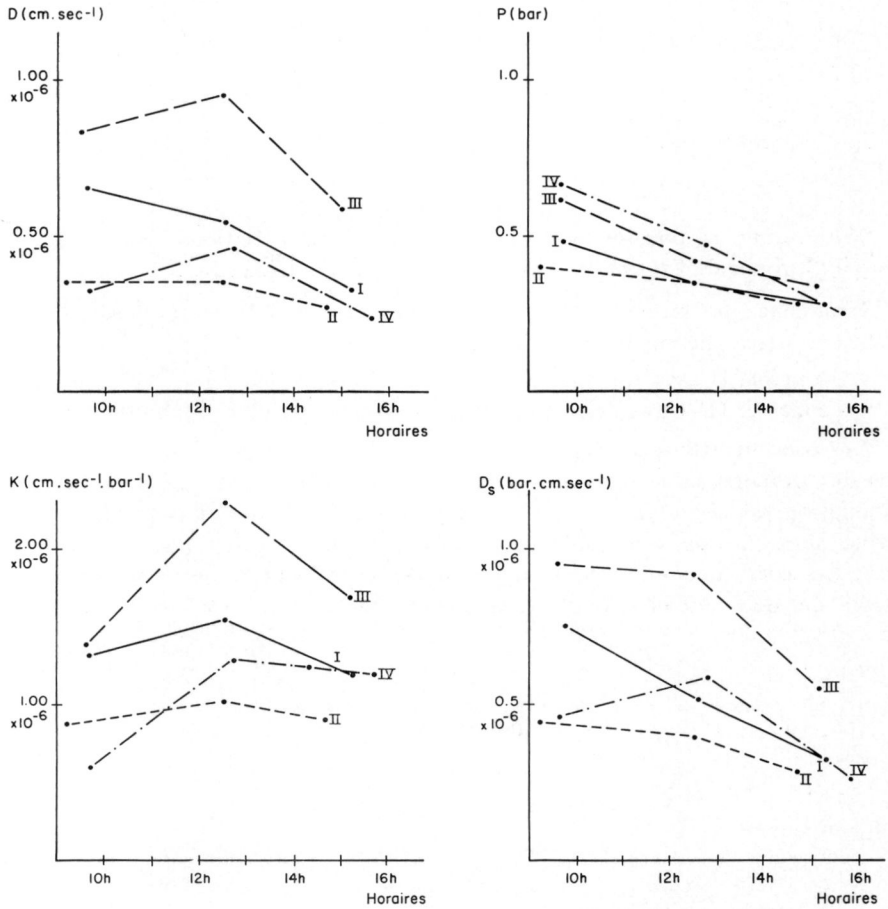


FIG. 1. — *Action des conditions climatiques sur les paramètres de l'exsudation*

D : Débit d'exsudation		I : Contrôle	I
P : Poussée radiculaire		II : —	II
K : Conductivité racinaire globale		III : —	III
D_s : Débit salin		IV : —	IV

La durée d'insolation joue un rôle particulièrement important sur le débit d'exsudation D dont les niveaux d'un contrôle à l'autre résultent des variations du débit salin D_s et de la conductivité K (fig. 1). La position relative des courbes d'évolution journalière correspond au classement des insolations.

La température précédant la date du contrôle qui, nous le rappelons, est lui-même effectué à température constante, ne semble pas avoir de répercussion sensible dans le cadre de cet essai.

TABLEAU I

Température moyenne θ_m (°C) *et durée d'insolation* S(h) *la veille des différents contrôles*

	Contrôle I 18/7	Contrôle II 23/7	Contrôle III 26/7	Contrôle IV 1/8
θ_m	17,3	17,3	23,0	26,5
S	3,2	2,0	7,6	2,0

Notons que la poussée radiculaire subit peu de variations, phénomène déjà observé à propos de l'action des facteurs nutritionnels (N. P. K.).

L'influence sur la composition de l'exsudat ressort de la comparaisons des deux conditions particulièrement contrastées :

— contrôle II avec une faible exsudation,

— contrôle III caractérisé au contraire par une exsudation abondante.

Les concentrations de chacun des éléments ne sont généralement pas modifiées dans des proportions importantes (tabl. 2). Elles peuvent être plus faibles quand l'exsudation est abondante : effet possible de dilution (cas du N total et du P le matin). Mais elles peuvent également être plus élevées (N nitrique, K et P l'après-midi). Les conditions climatiques défavorables entraînent toujours une diminution sensible des débits de chacun des éléments étudiés.

TABLEAU 2

Actions des conditions climatiques sur les concentrations C (mg.l^{-1}) *et débits salins* D_E (mg.cm^{-2}.sec^{-1}) *des éléments étudiés*

Horaire des prélèvements	N (total)		N (nitrique)		P		K	
	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$
Contrôle II : Exsudation faible								
8 h 10-11 h 00	412	154	198	74	63	24	277	104
11 h 00-14 h 30	383	138	195	70	34	12	240	86
14 h 30-17 h 00	315	85	204	55	25	7	270	73
Contrôle III : Exsudation abondante								
8 h 45-14 h 00	355	295	235	196	42	35	320	266
11 h 00-14 h 15	284	270	196	186	35	33	290	275
14 h 15-17 h 00	238	136	164	93	44	25	315	180

2. — *Interaction : conditions climatiques, alimentation totalement carencée* (O) *ou carencée en azote* (N_0)

La précocité d'apparition et l'intensité des symptômes de carence minérale qui se manifestent au niveau de l'exsudation, sont très variables. Parfois, il existe une différence très faible entre les témoins et les carencés au bout de deux jours et demi de traitement et, à l'inverse, une action très marquée peut apparaître à l'issue de quinze heures seulement.

D'une façon générale, quand les plantes témoins ont une exsudation faible, les différenciations entre traitements sont longues à apparaître, effet qui rejoint les observations de PÉRIGAUD (1967) sur l'absorption hydrique de la plante entière.

Nous donnerons l'exemple de deux contrôles réalisés à cinq jours d'intervalle (11 et 16 mai 1973) dont les témoins (T) présentent des débits d'exsudation très différents (tabl. 3). Le 11, l'exsudation est abondante ; le 16, par contre, les débits ont considérablement diminué à la suite vraisemblablement de températures excessives de l'ordre de 40°C les jours précédents.

L'alimentation carencée depuis quinze heures dans les deux cas, a eu des conséquences très différentes :

— le 11 mai, effets très marqués ;

— le 16 mai, effets beaucoup plus discrets notamment sur les conductivités racinaires ; il est même remarquable d'observer que, contrairement à celles des témoins, les valeurs absolues des différents paramètres relatifs aux traitements N_0 et O sont plus élevés le 16 que le 11.

3. — *Aération du milieu racinaire. Ennoyage*

Les premiers contrôles sont effectués une demi-heure après le début de l'ennoyage. A ce moment, les débits d'exsudation (traitement TE) ont déjà subi une diminution faible mais significative par rapport à ceux des témoins (T) (fig. 2). Lors des deuxièmes contrôles, trois heures plus tard environ, les différences se sont considérablement accusées et l'écart reste important dans la 3e série de mesures après suppression de l'ennoyage.

Les mêmes tendances se manifestent si l'on examine les variations des paramètres qui déterminent la valeur de D, c'est-à-dire la conductivité globale K et le débit salin D_s.

La poussée radiculaire est peu différente de celle des témoins. Cela s'explique, comme nous l'avons déjà noté (MORIZET et MINGEAU, 1976), par la variation concomitante et dans le même sens de la conductivité sélective (la variation de K en donne une bonne image) et du débit salin D_s.

Les concentrations des exsudats relatives à chacun des éléments sont peu affectées (tabl. 4) ; elles subissent cependant une légère augmentation. Les débits des éléments dosés sont fortement déprimés à partir du deuxième prélèvement, phénomène qui se poursuit d'ailleurs après la suppression de l'ennoyage.

TABLEAU 3

Intensité de l'action d'une alimentation totalement carencée (O) *ou carencée en azote* (N_0) *en fonction des facteurs climatiques*

Observations effectuées à 12 h		Contrôles du 11-5-1973 (Exsudation abondante des T)			Contrôles du 16-5-1973 (Exsudation faible des T)		
		Débits salins D_s	Conductivités K	Débits hydriques D	Débits salins D_s	Conductivités K	Débits hydriques D
T	Valeurs absolues	$0,61 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-6}$	$0,86 \cdot 10^{-6}$	$0,39 \cdot 10^{-6}$
	Valeurs relatives (par rapport aux témoins correspondants)	100	100	100	100	100	100
O	Valeurs absolues	$0,12 \cdot 10^{-6}$	$0,68 \cdot 10^{-6}$	$0,14 \cdot 10^{-6}$	$0,19 \cdot 10^{-6}$	$0,74 \cdot 10^{-6}$	$0,21 \cdot 10^{-6}$
	Valeurs relatives	20	56	25	44	85	54
N_0	Valeurs absolues	$0,28 \cdot 10^{-6}$	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,28 \cdot 10^{-6}$	$0,38 \cdot 10^{-6}$	$0,74 \cdot 10^{-6}$	$0,37 \cdot 10^{-6}$
	Valeurs relatives	46	53	50	88	85	95

TABLEAU 4

Action de l'ennoyage sur les concentrations C ($mg.l^{-1}$) *et débits* D_E ($mg.cm^{-2}.sec^{-1}$) des *éléments étudiés*

Horaire des prélèvements	Traitements	N (total)		N (nitrique)		P		K		Ca	
		C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$	C	$D_E \times 10^{-9}$
8 h 45-11 h	T	355	295	235	196	42	35	320	266	176	146
	TE	400	260	268	174	47	31	380	267	197	128
11 h-14 h 15	T	284	270	196	186	35	33	290	275	133	126
	TE	322	135	256	108	39	16	405	170	186	78
14 h 15-17 h	T	238	136	164	93	44	25	315	180	119	68
	TE	280	81	208	60	31	9	390	113	156	45

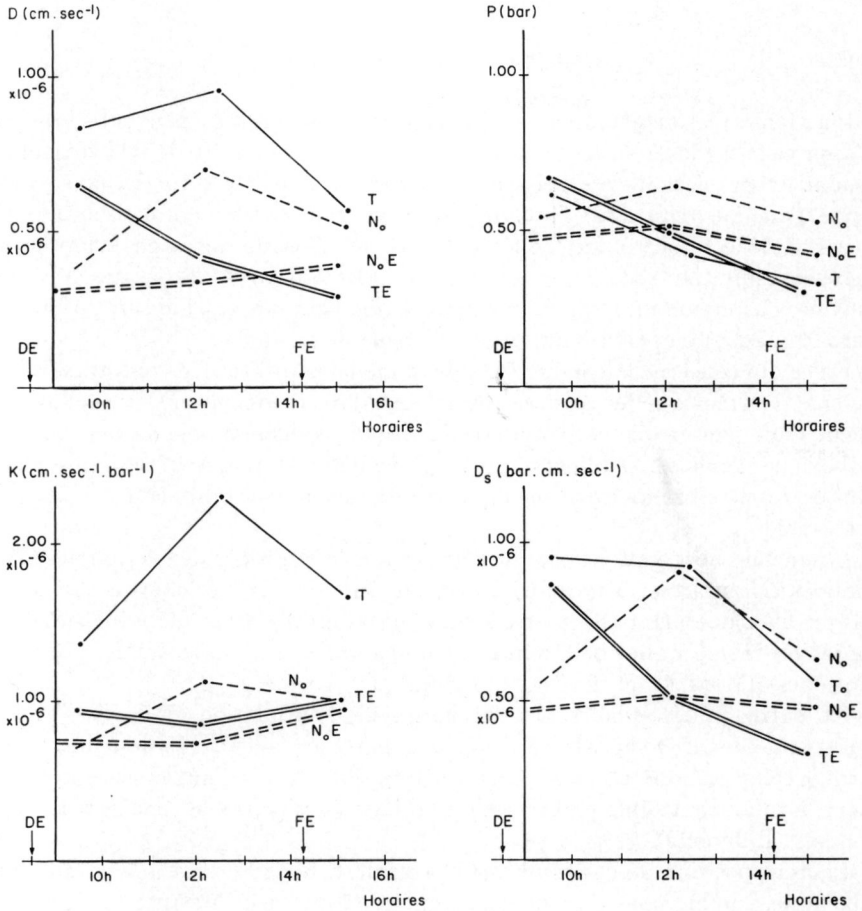


FIG. 2. — *Influence de l'ennoyage sur les paramètres de l'exsudation*

T : non carencé, drainage normal
N_o : sans azote, drainage normal
TE : non carencé, ennoyé
N_oE : sans azote, ennoyé
DE : Début de l'ennoyage
FE : Fin de l'ennoyage

4. — *Interaction : Ennoyage-alimentation azotée*

Les résultats de ces actions conjointes (fig. 2) peuvent se résumer ainsi :

— l'effet simultané de la carence azotée et de l'ennoyage ne se traduit que par une faible diminution de la conductivité par rapport aux actions séparées de l'une ou de l'autre ;

— la résultante observée sur les débits salins dérive, en première approximation, de l'addition des effets de chacun des traitements ;

— finalement, la variation des débits d'exsudation sous cette double influence, se présente comme un « cumul atténué » des effets individuels.

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'action sur les débits salins des facteurs physiques étudiés, peuvent s'interpréter en s'appuyant sur les données acquises par ailleurs. La quantité de sels véhiculés par l'exsudat est en relation évidente avec l'absorption saline. Or, cette dernière, consommatrice d'énergie, dépend de l'activité photosynthétique, donc de l'insolation. Cette interprétation est tout à fait cohérente avec les liaisons mises en évidence entre lumière et respiration racinaire (HARRIS et VAN BAVEL, 1957 ; FROSSARD, à paraître). De même, l'asphyxie du système racinaire freine brutalement l'absorption minérale (PÉRIGAUD, 1967) en perturbant le métabolisme de la racine.

En ce qui concerne la conductivité de la racine pour l'eau, les résultats présentés ci-dessus montrent que les réponses de K vont dans le même sens que celles de D_s ; on peut donc penser que ce paramètre se trouve également sous la dépendance du métabolisme racinaire. D'ailleurs, il est logique d'admettre que la structure physico-chimique des membranes cytoplasmiques est en liaison avec l'intensité et l'orientation de ce dernier.

Les mêmes observations pouvant être formulées à propos de l'action des facteurs chimiques (MORIZET et MINGEAU, 1976), on peut dire en résumé que l'absorption hydrique chez une plante décapitée est en liaison étroite avec l'activité métabolique de la racine, même si elle obéit pour l'essentiel à une loi physique simple (phénomènes osmotiques) (MORIZET et ROBELIN, 1975).

En outre, la dépendance des paramètres de l'exsudation vis-à-vis du métabolisme et le nécessaire relais assuré par celui-ci entre les facteurs du milieu et ces paramètres, expliquent que D_s et K réagissent toujours l'un et l'autre, et non pas séparément, à toute contrainte extérieure (la rapidité de réponse de chacun pouvant être cependant différente).

La transposition de ces résultats au transfert de l'eau dans une plante entière, est possible, comme nous l'avons déjà signalé (MORIZET et MINGEAU, 1976) pour la variation de la conductivité et beaucoup moins pour celle des débits salins car les gradients osmotiques deviennent négligeables devant les gradients hydrostatiques. Un bilan photosynthétique faible ou une aération du milieu racinaire mauvaise augmentent les résistances de la racine à l'absorption de l'eau. Ce phénomène explique les observations formulées par KRAMER (1949) et WILLEY (1970) et également les conséquences paradoxales d'un excès d'eau qui s'apparentent aux effets de la sécheresse quant à l'état d'hydratation des tissus.

Néanmoins, les conséquences pour une plante sur le plan hydrique ne sont pas les mêmes s'il s'agit d'une faible activité photosynthétique liée à une insolation réduite ou s'il s'agit d'une aération déficiente du système racinaire. Dans le premier cas, les effets de la variation de conductivité sur le bilan hydrique de la plante sont très atténués par la variation simultanée et dans le même sens du flux transpiratoire sous l'action de l'éclairement. Dans le second cas, au contraire, l'aération du milieu racinaire étant indépendante de l'insolation, l'équilibre hydrique de la plante peut être rompu et ceci d'autant plus que la demande climatique est élevée.

Reçu pour publication en mai 1976.

SUMMARY

INFLUENCE OF ENVIRONMENT FACTORS ON WATER ABSORPTION. STUDY CARRIED OUT ON DECAPITATED TOMATOES UNDER EXSUDATION. II. — PHYSICAL FACTORS AND INTERACTIONS WITH MINERAL NUTRITION

This study aimed at analysing the influence of two environment physical factors on water absorption by tomato seedlings : climatic conditions of the epigeous part and aeration of root environment. As in a preceding work on the action of nutritional factors, the observations bear on the different parameters ruling the exsudation of decapitated plants.

A low insolation of the epigeous part and a defective aeration of root environment both induce a reduction of salt flows and root conductivity for water. There follows a reduction of exsudation rates and consequently of water absorption.

It can be concluded that water absorption in a decapitated plant is closely controlled by the metabolic activity of the root even if fundamentally it is ruled by a simple physical law (osmotic phenomena).

The transposition of these results to water transfer in a whole plant is only valid for root conductivity for water.

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS DER UMWELTFAKTOREN AUF DIE WASSERAUFNAHME. EINE AUF AUSSCHWITZENDE ENTHAUPTETE TOMATEN DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNG II. — PHYSIKALISCHE FAKTOREN UND WECHSELWIRKUNGEN MIT MINERALERNÄHRUNG

In dieser Untersuchung handelt es sich um die Analyse des Einflusses von zwei physikalischen Umweltfaktoren auf die Wasseraufnahme durch Tomatensetzlingen : klimatische Bedingungen der oberirdischen Teilen und Lüftung der Wurzelumgebung. Wie in einer vorkommenden Arbeit über die Wirkung der Ernährungsfaktoren Betreffen die Beobachtungen verschiedene Parameter der Ausschwitzung von enthaupteten Pflanzen.

Eine schwache Sonneneinstrahlung der oberirdischen Teilen und eine mangelhafte Belüftung der Wurzelumgebung zugleich erzeugen eine Verminderung der Salzmengen und der Wasserleitung in der Wurzel. Daraus folgt eine Abnahme der Ausschwitzungs mengen und also der Wasseraufnahme.

Es wird geschlossen dass Wasseraufnahme in einer enthaupteten Pflanze mit Wurzelstoffwechsel eng verbunden ist, selbst wenn sie vor allem einem einfachen physikalischen Gesetz unterworfen ist (osmotische Erscheinungen).

Die Anwendung dieser Ergebnisse auf Wasserübertragung in einer unversehrten Pflanze ist nur gültig für die Wasserleitung in der Wurzel.

РЕЗЮМЕ

Влияние факторов среды на поглощение влаги. Изучение плача обезглавленного растения томата. — II. Физические факторы и их взаимодействие с минеральным питанием.

Ж. МОРИЗЕ, М. МЕНЖО.

Целью данного труда является анализ влияния двух физических факторов среды на поглощение влаги растениями томата : климатических

условий в которых находятся обезглавленные части растения, и аерации корневой среды. Как и в предидущей работе о действии факторов питания, наблюдения велись над различными параметрами плача обезглавленных растений.

Слабая инсоляция обезглавленных частей и недостаточность аерации корневой среды вызывают ослабление расхода солей и корнепроводимости. Из этого вытекают ослабление силы плача и значит, поглощения влаги.

Делается вывод, что поглощение влаги обезглавленным растением томата, находится в тесной зависимости от метаболической активности корней, даже тогда, когда, в основном, оно подчиняется простому физическому закону (осмотические явления).

Транспонировка этих результатов на цельное растение действительна только для корнепроводимости в отношении влаги.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FROSSARD J. S., 1976. Relations entre l'éclairement des feuilles et l'absorption d'oxygène par les racines chez le Tournesol (*Helianthus annuus* L.). *Ann. agron.*, **27** (6).

HARRIS D. G., VAN BAVEL C. H. M., 1957. Root respiration of tobacco, corn and coton plants. *Agron. J.*, **49**, 182-184.

KRAMER P. J., 1949. *Plant and Soil water relationships*. McGraw-Hill Book Company, London, p. 142-152 et 220-227.

MORIZET J., ROBELIN M., 1975. Évaluation de la poussée radiculaire. Confrontation des résultats avec les données de la théorie osmotique. Calcul de la conductivité des racines pour l'eau. *Ann. agron.*, **26** (2), 125-137.

MORIZET J., MINGEAU M., 1976. Influence des facteurs du milieu sur l'absorption hydrique. Étude sur tomate décapitée en exsudation. I. Facteurs nutritionnels. *Ann. agron.*, **27**.

PÉRIGAUD S., 1967. Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur la croissance et la nutrition globale de la plante. *Ann. agron.*, **18** (5), 485-506.

WILLEY C. R., 1970. Effects of short periods of anaerobic and near anaerobic conditions on water uptake by tobacco roots. *Agron. J.*, **62**, 224-229.

Ann. agron., 1976, **27** (3), 343-361.

INFLUENCE D'UNE IRRIGATION LOCALISÉE SUR L'ENRACINEMENT DE JEUNES POMMIERS

J. G. HUGUET
avec la collaboration technique de J. GIRAUDON

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Bordeaux, I. N. R. A.,
Domaine de La Grande Ferrade,
33140 Pont de la Maye

RÉSUMÉ

Les enracinements de jeunes pommiers Golden, en verger enherbé sur un sol sablo-argileux, sont étudiés par la méthode de tranchée spirale. Les résultats sont des données qualitatives et quantitatives qui définissent la distribution de la charpente racinaire et du système absorbant.

Trois méthodes d'irrigation apportent, en localisation plus ou moins étroite, le même volume d'eau correspondant approximativement à l'E.T.P. de la parcelle ; leurs effets sont comparés à ceux d'un traitement sans irrigation.

Dans les conditions de l'essai, l'irrigation par aspersion entraîne probablement un gaspillage d'eau et limite l'enracinement à une zone superficielle.

L'irrigation localisée à partir d'un seul point d'application conduit à un enracinement chétif qui aurait comme origine une saturation et un lessivage dans la zone du collet de l'arbre. Le débit élevé de l'ajutage d'irrigation (5 l/h) et la distance trop faible (30 cm) entre le tronc et le point de localisation expliqueraient ces conséquences.

L'irrigation localisée par deux points d'irrigation à débit modéré (2 l/h), situés symétriquement à 50 cm du tronc, conduit à un enracinement dense et régulier, avec une bonne exploration du sol et du sous-sol, comme si un gradient dégressif et symétrique de l'humidité par rapport au tronc était très favorable à une répartition efficace du système racinaire.

INTRODUCTION

Le principe de l'irrigation localisée correspond à toutes les techniques de distribution fréquente d'eau en faible quantité, à partir d'ajutages de débit limité installés sur un réseau fixe. Le principal intérêt de ces méthodes se situe au niveau d'une économie très sérieuse de main-d'œuvre et de la simplicité des manipulations. L'économie d'eau possible et la diminution des traitements fongicides par rapport à l'aspersion sont également des facteurs qui expliquent la rapide vulgarisation de ces techniques.

Ces méthodes impliquent la disparition du ruissellement de l'eau sur le sol et une répartition par capillarité au sein de volumes dont la forme dépend de la texture, de la structure, de l'homogénéité du terrain et de l'humidité du sol au début de l'apport. Cette irrigation réduite sur des surfaces restreintes suppose donc l'existence de volumes limités de sols dans lesquels la disponibilité de l'eau sera supérieure et très différente du reste de la parcelle.

Imaginées en Angleterre en 1945, puis perfectionnées et expérimentées en Australie et en Israël à partir de 1960, ces techniques se sont développées très récemment en France, où l'on a pu estimer qu'il y avait, en 1973, 2 000 ha en irrigation localisée, dont 45 p. 100 concernant l'arboriculture fruitière (ROLLAND, 1974).

Le caractère récent de ces applications a pour conséquence un manque d'information en ce qui concerne l'étude des répercussions agronomiques de l'irrigation localisée, en arboriculture fruitière notamment.

Il paraît logique de supposer que l'introduction d'une hétérogénéité hydrique sur un terrain peut avoir des conséquences particulières sur l'implantation des systèmes racinaires de végétaux pérennes. L'étude des interactions entre l'irrigation localisée et la distribution racinaire est donc le complément nécessaire de toute expérimentation de longue durée dans ce domaine.

C'est ainsi que nous avons été amenés à étudier l'enracinement de pommiers dans un essai d'irrigation localisée. Cet essai, conçu et mis en place par le « Groupement Agricole d'exploitation de Borde-Haute » avec le concours technique de la Société S.O.G.R.E.A.H. a été suivi et contrôlé par le C.E.T.G.R.E.F.* en ce qui concerne toutes les observations relatives à la croissance, à la qualité des fruits, aux rendements, aux profils hydriques et au bilan économique.

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. — *Sol et matériel végétal*

Cette étude a été réalisée dans un verger enherbé de pommiers Golden greffés sur M.M.106 et plantés durant l'hiver 1970-71 à 2,50 m d'intervalle sur la ligne et 4 m entre les rangs. Le sol (alluvions récentes du Tarn) est profond, de texture sablo-argileuse (argile : 15 p. 100 ; limons 20-50 μ : 14,4 p. 100 ; sables fins : 66 p. 100 ; sables grossiers : 3 p. 100).

Au cours de l'étude des profils, nous avons pu juger d'une excellente homogénéité en profondeur sans trouver d'horizon hydromorphe et observer des traces d'activité biologique (trous de vers, insectes et mollusques divers) jusqu'à plus de 50 cm de profondeur.

La fertilisation minérale a été constituée par une importante fumure de fond (de l'ordre de 500 kg/ha de P_2O_5 et K_2O) et des apports annuels en progression de 100 à 200 kg/ha des trois éléments majeurs (N.P.K.).

Il n'y a jamais eu d'apport fertilisant par les réseaux d'irrigation.

B. — *Protocole de l'essai irrigation*

Notre étude a porté sur quatre traitements :

— traitement *sec :* sans irrigation ;

Il faut noter que, depuis la plantation de l'essai jusqu'en 1974, ce traitement a bénéficié d'étés relativement humides ; en effet, pour les années 1971-1972 et 1973, la pluviométrie d'avril à septembre à correspondu, en moyenne, à 63 p. 100 de l'E.T.P.

— traitement *aspersion* ;

* Centre Technique du Génie Rural et des Eaux et Forêts, Groupement de Bordeaux, B.P. 3, 33610 Gazinet.

Les doses ont varié de 30 à 50 mm par apport à des intervalles de temps fluctuant entre deux et trois semaines.

— traitement *unique :* mis en place en 1972 — un seul orifice d'irrigation par arbre (tube capillaire) situé sur la ligne de plantation à environ 30 cm du tronc ; le débit est de 5 l/heure (fig. 1) ; jusqu'à l'installation du traitement *unique* cette parcelle a été irriguée par aspersion (1 an).

— traitement *double* mis en place en 1971 : 2 ajutages de type australien par arbre, avec dissipation de la pression par un trajet spirale. Les deux orifices d'irrigation sont situés sur la ligne de plantation, à environ 50 cm de part et d'autre du tronc ; le débit par orifice est de 2 l/heure (fig. 1).

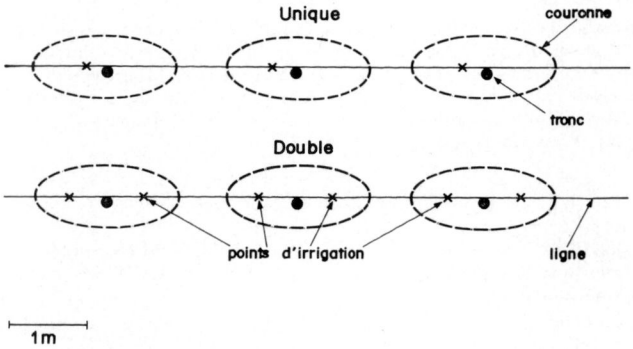


FIG. 1. — *Position des points d'irrigation localisée*

Pour les traitements en irrigation localisée, les apports se faisaient tous les deux jours en période d'arrosage.

Dans le principe de l'essai, chaque traitement irrigué devait recevoir le même volume global correspondant sans restriction à l'E.T.P. de la parcelle, évaluée sur place, à partir des indications d'un évaporomètre de Piche.

Pour l'irrigation par aspersion, les apports d'eau ont suivi cette règle ; par contre, pour les deux types d'irrigation localisée, il semble que le bilan ait toujours été déficitaire ; ce qui revient à dire qu'un coefficient de rationnement a été introduit involontairement. En 1973, ce coefficient de rationnement a été de 0,70 pour le traitement *double* et de 0,77 pour le traitement *unique* (DUPRAT, 1975).

C. — *Méthode d'étude de l'enracinement*

Notre intervention dans cet essai s'est strictement limitée à une étude comparative des types d'enracinement développés sous les quatre traitements. Pour cette étude de la disposition racinaire, nous avons employé la méthode de la tranchée spirale.

Le choix de la formule d'une spirale de base a tenu compte des caractéristiques moyennes des arbres étudiés : diamètres des troncs et rayons des couronnes (HUGUET, 1973) (fig. 2).

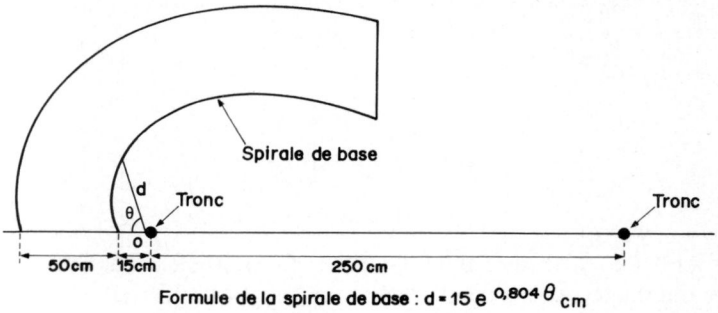


FIG. 2. — *Position et forme de la tranchée*

L'exploration des tranchées a été interrompue à proximité de la ligne d'équidistance entre les deux arbres.

La tranchée est de même modèle pour chaque arbre étudié, la spirale externe étant une spirale parallèle située à 50 cm de la spirale de base.

Pour chaque tranchée, les observations consistent à relever le nombre et la position des sections de racines de pommier par référence au système de coordonnées d'un filet à mailles carrées de 11 cm de côté.

Dans chaque maille sont notés :

— le nombre total de sections de racines ;

— le diamètre des racines de diamètre supérieur ou égal à 1 mm.

Ces observations sont enregistrées pour les deux parois de la tranchée, sur 198 cm de longueur développée pour la paroi interne, 264 cm pour la paroi externe et 60 cm de profondeur. Pour chaque traitement sont réunies les observations relatives à trois tranchées distinctes constituant des répétitions. L'ensemble de l'étude a donc porté sur 12 tranchées ouvertes et observées en novembre 1974, soit au moins 28 mois après la fin de la mise en place du réseau d'irrigation sur le dernier traitement (traitement *unique*).

D. — *Traitement des observations*

Les observations brutes recueillies par maille (11 × 11 cm) sont regroupées pour correspondre à des classes représentant des portions de la surface des parois définies par une longueur sur l'arc de spirale et une hauteur.

Deux classes sont définies ; elles ont la même longueur selon l'arc de spirale (22 cm) :

— classe sol de 22 cm de hauteur, située entre 0 et 22 cm de profondeur ;

— classe sous-sol de 33 cm de hauteur, située entre 22 et 55 cm de profondeur.

Chaque classe sur une paroi est définie par la position du centre de l'arc de spirale sous lequel elle se situe, à l'aide d'un certain nombre de variables principales :

X_1 : distance par rapport au tronc de l'arbre étudié ;

X_2 : distance par rapport à la ligne de plantation ;

X_3 : distance par rapport aux orifices d'irrigation localisée et de variables subsidiaires, comme l'angle du rayon vecteur par rapport à la ligne de plantation et la distance de l'arbre voisin.

Sur le modèle de tranchée utilisé, il existe 9 classes « sol » et 9 classes « sous-sol » sur la paroi interne, 12 sur la paroi externe.

La rigueur mathématique du tracé de la tranchée autorise un calcul automatique de toutes ces variables, et un stockage approprié sur bande magnétique, en vue de leur traitement par les moyens informatiques dont nous disposons.

Pour chaque classe, les informations brutes sont réduites à deux grandeurs :

— la grandeur Y_1, égale au nombre de sections de toutes les racines observées dans la classe, grandeur qui dépend principalement de la densité des petites racines ; cette grandeur est donc représentative du système absorbant.

— La grandeur Y_2, égale à la somme des surfaces des sections de toutes les racines de diamètre égal ou supérieur au millimètre, dans la classe considérée, grandeur qui nous paraît la plus judicieuse pour définir l'état de la charpente racinaire dans une zone donnée.

Pour chaque classe, nous avons une série de données constituée de l'une des deux grandeurs Y_1 ou Y_2, associée aux variables : X_1, X_2, X_3... Xn propres à la classe considérée.

Par grandeur Y et par traitement, nous disposons de :

$$(12 + 9) \times 3 = 63 \text{ séries de ce type}$$

II. — RÉSULTATS

A. — *Traitement des données*

L'idée qui nous a dirigés dans le choix du traitement des données a été de trouver les méthodes permettant une comparaison objective de l'influence des quatre traitements sur l'enracinement des pommiers. Dans ce but, nous avons cherché

TABLEAU I. — *Matrice des coefficients de corrélation*

	Distances entre la ligne de prospection et :								Total entre 0-55 cm		Sol entre 0-22 cm	
	le tronc		la ligne de plantation		I_1 premier point d'irrigation		I_2 deuxième point d'irrigation					
Y 1 Sol entre 0 et 22 cm	— 0,23 — 0,52 (2)*	— 0,53 — 0,65 (3)	— 0,23 — 0,38 (3)	— 0,57					+ 0,73	+ 0,80	1	1
	— 0,46 — 0,53 (2)	NS	— 0,49 — 0,59 (2)	— 0,32	— 0,40 — 0,45 (2)	NS	+ 0,40	NS	+ 0,66	+ 0,62	1	1
Y 1 sous-sol entre 22 et 55 cm	— 0,34	— 0,38	— 0,45 — 0,67 (2)	— 0,50					+ 0,86	+ 0,85	+ 0,28	+ 0,36
	— 0,29 — 0,35 (2)	NS	— 0,36	NS	— 0,34 — 0,41 (3)	NS	+ 0,30	NS	+ 0,76	+ 0,83	NS	NS
Y 2 sol entre 0 et 22 cm	— 0,29	— 0,42 — 0,72 (3)	NS	— 0,36 — 0,55 (3)					+ 0,55	+ 0,97	1	1
	— 0,36 — 0,60 (3)	— 0,47 — 0,72 (3)	— 0,29 — 0,42 (2)	— 0,37 — 0,49 (2)	— 0,31 — 0,54 (3)	NS	+ 0,29	+ 0,40	+ 0,99	+ 0,78	1	1
Y 2 sous-sol entre 22 et 55 cm	— 0,35	— 0,33	— 0,35	— 0,30 — 0,37 (3)					+ 0,88	NS	NS	NS
	NS	— 0,26	NS	— 0,22	NS	NS	NS	NS	+ 0,31	+ 0,71	NS	NS

Légendes : Y 1 = nombre total de sections de racines ; Y 2 = somme de surface des sections de racines de diamètre ⩾ à 1 mm ;
* (2) : degré du polynome ;
seuil de signification du coefficient de régression pour 63 couples : 0,25 à 5 p. 100 ; 0,33 à 1 p. 100 ;
NS = non significatif.

sec	aspersion
unique	double

l'intensité des liaisons éventuelles entre les grandeurs observées et les différentes variables de position. Le premier traitement des données a consisté à établir la matrice des coefficients de corrélation entre les grandeurs observées et les variables définies prises 2 à 2, chaque coefficient étant le résultat de l'étude de la régression entre 63 couples. Mais il est possible de poursuivre l'interprétation en recherchant, par un ajustement polynomial pour chaque série de 63 couples, si l'intensité de la liaison n'est pas améliorée par le passage à un polynome du degré supérieur. Pratiquement, nous avons exploré ces régressions polynomiales jusqu'au 3e degré en n'acceptant le passage au degré supérieur que dans le cas où le coefficient de corrélation correspondant était augmenté d'environ 10 p. 100 par rapport au coefficient de corrélation relatif au degré précédent — étant bien entendu que le coefficient de corrélation du polynome retenu devait être au moins significatif. Le tableau 1 représente la matrice des coefficients de corrélation.

Commentaire à propos des graphiques.

Les figures 3 à 6 représentent les fonctions de régression représentatives des liaisons statistiquement significatives.

Dans ces graphiques, nous avons adopté la convention de tracer une ligne horizontale d'ordonnée égale à la moyenne des 63 valeurs de Y lorsque, pour un traitement, ces valeurs n'avaient pas de liaison significative avec la variable de position étudiée.

B. — *Distribution des racines par rapport au tronc*

1. — *Densité des racines.*

L'examen du tableau 1 montre qu'il existe une corrélation négative très significative entre la distance du tronc et la densité des racines pour les traitements : *sec, aspersion,* et *unique ;* cette liaison est plus étroite dans le sol que dans le sous-sol.

Au contraire, il n'existe pas de liaison pour le traitement *double* qui traduit une certaine constance de la répartition des racines dans l'intervalle étudié, indépendamment de la distance du tronc.

Pour les traitements *unique* et *double,* aucune liaison n'apparaît entre les distributions dans le sol et dans le sous-sol, ce qui est sans doute la conséquence de l'hétérogénéité de la répartition hydrique.

La figure 3 représente les courbes calculées de la distribution des racines en fonction de la distance du tronc.

a) *Dans le sol,* le traitement *aspersion* se maintient au-dessus des autres, surtout à proximité du tronc. Par contre, dans cet horizon superficiel, le traitement *unique* est parfaitement assimilable au traitement *sec.* Une augmentation des densités apparaît pour le traitement *sec* à partir de 130 cm du tronc, ce qui s'interprète comme l'interpénétration de systèmes racinaires voisins. La sécheresse favoriserait une plus grande extension en longueur des racines, puisque l'on ne retrouve pas le même phénomène en *aspersion.*

b) *Dans le sous-sol,* pour tous les traitements, les densités moyennes sont plus fortes que dans le sol et ce sont les traitements *double* et *sec* de densités moyennes comparables qui restent supérieurs aux deux autres.

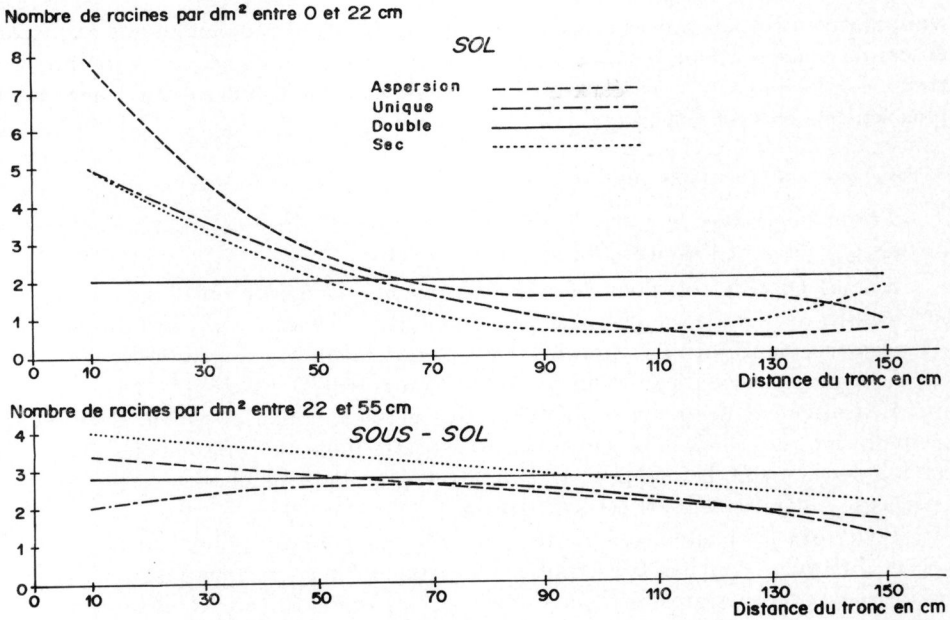


FIG. 3. — *Courbes calculées de la densité des racines en fonction de la distance du tronc*

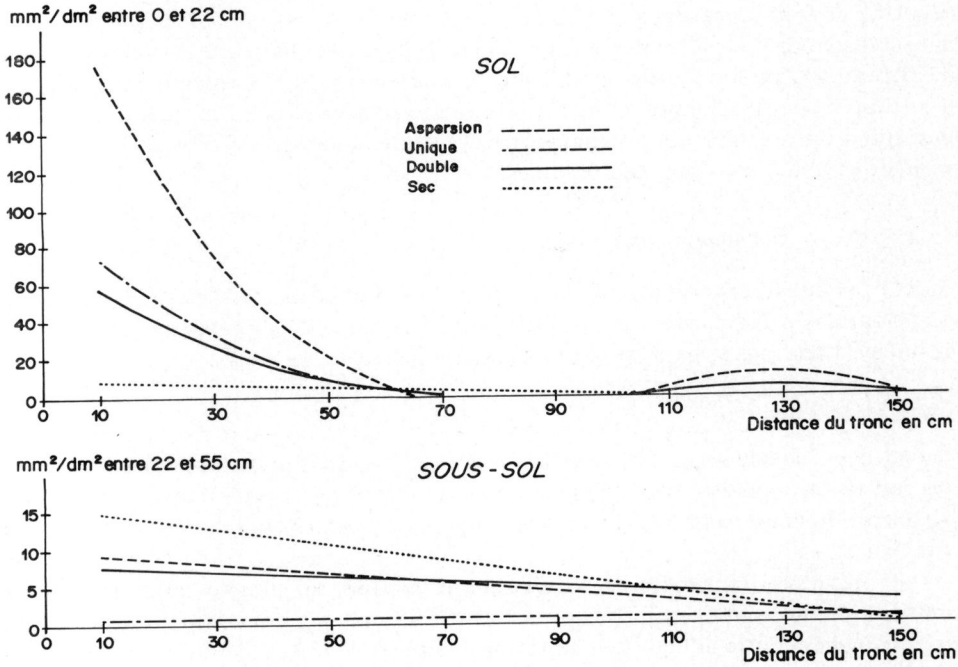


FIG. 4. — *Courbes calculées des sommes de sections de grosses racines* (racines de diamètre ⩾ 1 mm) *en fonction de la distance du tronc*

A proximité du tronc, la densité racinaire du traitement *unique* est déprimée comparativement aux autres traitements, puisqu'elle atteint son maximum à environ 80 cm du tronc. Comme le point d'irrigation du traitement *unique* est situé près du tronc, ce phénomène est révélateur d'un excès d'eau, dont l'effet est naturellement plus sensible en profondeur.

2. — *Charpente racinaire* (fig. 4).

Par analogie avec le système aérien, nous appelons ainsi l'ensemble des grosses racines qui forment l'ossature du système racinaire.

a) *Sol.* Dans le sol, pour tous les traitements, la liaison entre la somme des surfaces des sections des grosses racines (diamètre $\geqslant$ 1 mm) et la distance du tronc est négative, significative et linéaire pour le traitement *sec*, très hautement significative et de troisième degré pour les autres traitements.

Le traitement *aspersion* se distingue très nettement par la vigueur de sa charpente racinaire à proximité du tronc. Dans cette zone, les traitements *double* et *unique* développent la même charpente mais plus faible que sous *l'aspersion* ; la charpente du traitement *sec* est squelettique.

Pour tous les traitements, cette charpente disparaît pratiquement à partir de 70 cm du tronc. Pour les trois traitements irrigués, mais surtout pour *l'aspersion*, on retrouve quelques grosses racines dans cet horizon de surface, au-delà de 110 cm du tronc, une fois franchie la zone de roulement des engins ; ce point sera repris dans le paragraphe C I a.

b) *Sous-sol.* Dans le sous-sol, la liaison charpente-distance du tronc reste négative et seulement linéaire pour les traitements *sec*, *aspersion* et *double*. Cette liaison disparaît pour le traitement *unique*, pour lequel la charpente est pratiquement inexistante en profondeur. Pour les autres traitements, la charpente racinaire est beaucoup moins développée qu'en surface. Le traitement *sec* a la charpente relative la plus importante tandis que les charpentes des traitements *aspersion* et *double* ont une vigueur et une disposition comparables.

C. — *Distribution des racines par rapport à la ligne de plantation*

Les points d'irrigation localisée se situent sur la ligne de plantation, ce qui risque de perturber la régularité dans la distribution rayonnante des systèmes racinaires, au même titre que le passage régulier des engins entre les rangs.

1. — *Densité racinaire.*

a) *Sol.* Dans le sol, quel que soit le traitement, la liaison inverse entre la densité des racines et la distance de la ligne est très significative, linéaire dans le cas de l'*aspersion* et du traitement *double*; de degré supérieur pour les traitements *sec* et *unique* (tableau 1).

A proximité immédiate de la ligne de plantation, les plus fortes densités sont obtenues par les traitements *aspersion* et *unique*, ce qui se comprend puisque le départ de la tranchée contre la ligne de plantation se situe à l'emplacement d'un point d'irrigation ; les traitements *sec* et *double* sont comparables (fig. 5).

Au-delà de 40 cm de la ligne de plantation, les traitements *sec* et *unique*

deviennent semblables, ce qui peut laisser supposer que l'on sort de la zone d'influence du point d'irrigation *unique* au-delà de 60 cm à partir de ce point. Le traitement *aspersion* décroît rapidement et régulièrement d'une densité élevée à proximité de la ligne jusqu'à une faible valeur à 130 cm, distance où le traitement *double* donne la plus forte densité, avec une faible diminution depuis la ligne de plantation.

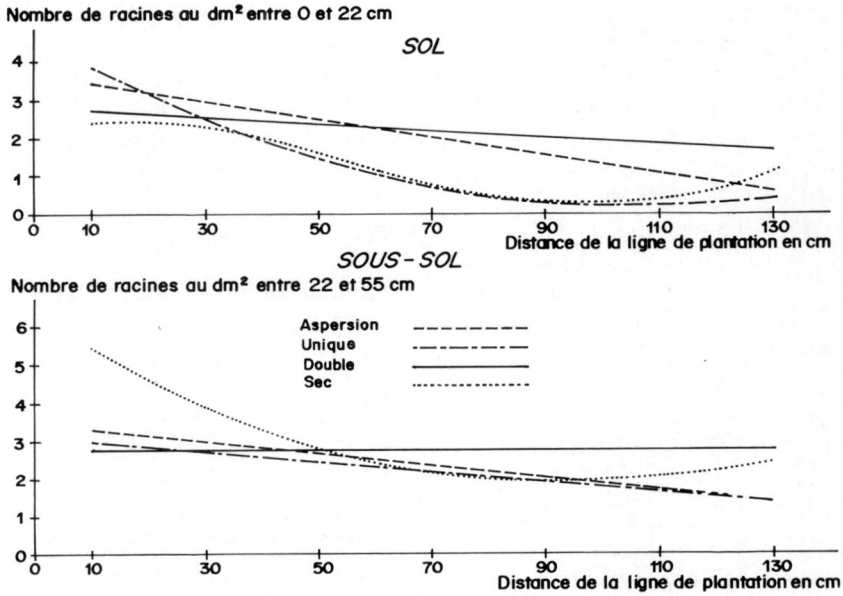


FIG. 5. — *Courbes calculées de la densité des racines en fonction de la distance de la ligne de plantation*

La dépression des densités entre 70 et 110 cm dans la zone de passage des engins pour les traitements *unique* et *sec* paraît anormale pour ces traitements puique la sécheresse relative du sol à cette distance devrait normalement le rendre moins sensible à la détérioration de la structure que les traitements *double* et *aspersion*. Cette contradiction peut être levée si l'on considère qu'en verger enherbé, sur terrain riche en éléments fins, un engazonnement puissant favorisé par une humidité satisfaisante donne au sol une structure plus favorable aux racines qu'un terrain sec faiblement enherbé et régulièrement tassé.

b) *Sous-sol*. Dans le sous-sol, une liaison inverse hautement significative existe pour les traitements *sec*, *aspersion* et *unique*, tandis qu'il n'existe pas de liaison pour le traitement *double*, dont la moyenne des densités est relativement plus élevée que celle des autres traitements.

A proximité immédiate de la ligne, le traitement *sec* atteint la plus forte densité, ce qui peut être dû à la présence d'une zone plus humide à l'ombre du rang d'arbres palissés, ainsi qu'à une texture plus favorable que l'on retrouve également, une fois dépassée la bande de roulement. Les traitements *aspersion* et *unique* entraînent une répartition parfaitement comparable de racines.

2. — *Charpente racinaire.*

a) *Sol.* Dans le sol, l'importance de la charpente racinaire est en liaison inverse hautement significative avec la distance de la ligne de plantation, uniquement pour les traitements irrigués (tableau 1), le traitement *sec* ayant par ailleurs une très faible charpente dans le sol (fig. 6). On retrouve dans la répartition de la charpente par rapport à la ligne les mêmes dispositions relatives des traitements que dans la répartition par rapport au tronc (fig. 4). Cependant, cette charpente disparaît à partir de 60 cm de la ligne, pour ne réapparaître notablement dans le cas de l'*aspersion* qu'une fois passée la bande de roulement des engins. L'*aspersion* qui, dans ce type de sol enherbé, ne provoquerait pas sous la bande de roulement d'effets dévorables aux petites racines (paragraphe C I, fig. 5), aurait un effet contraire sur les grosses racines.

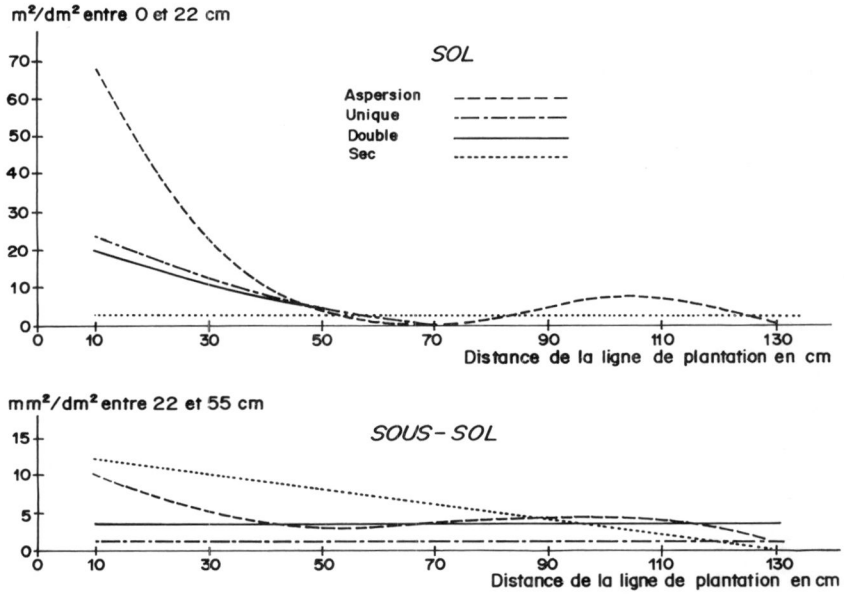


FIG. 6. — *Courbes calculées des sommes des sections des grosses racines en fonction de la distance de la ligne de plantation*

b) *Sous-sol.* Les traitements *unique* et *double* n'ont pas de liaison significative avec la distance de la ligne (tableau 1). C'est encore le traitement *sec* qui a la charpente la plus vigoureuse dans le sous-sol, tandis que, pour le traitement *aspersion*, on retrouve atténué l'effet dépressif sur la charpente du tassement de la bande de roulement.

D. — *Distribution des racines par rapport aux points d'irrigation*

La liaison entre la distance du point d'irrigation le plus proche de la zone de départ de la tranchée spirale (Distance I_1, tableau 1), la densité et la somme des surfaces des sections des racines n'est significative que pour le traitement *unique*.

Or, pour ce traitement, si l'on compare l'intensité de ces liaisons avec les liaisons relatives à la distance du tronc, on constate une forte similitude. En fait, le phénomène est explicable puisque le point d'irrigation du traitement *unique* débouche à

30 cm du tronc et que, de ce fait, le rapport entre la distance du tronc et la distance du capillaire tend vers 1 à mesure que ces distances augmentent. Si l'on trace les courbes correspondant à ces liaisons pour le traitement *unique*, on retrouve donc des courbes très proches (courbes non données) de celles observées pour ce traitement dans les figures 3 et 4 ; leur seule différence nette se situe au niveau des densités de racines dans le sous-sol à proximité du point unique d'irrigation. A 10 cm de ce point, la courbe correspondante tend vers zéro, ce qui confirme l'hypothèse d'engorgement de cet horizon, déjà exprimée au paragraphe B 1 *b*. Le maximum de densité se situe aux environs de 70 cm du capillaire.

La distribution de l'enracinement est liée à la distance du point d'irrigation de l'arbre voisin (I_2) d'une façon positive, c'est-à-dire que le nombre des racines comme le diamètre des grosses racines diminuent en s'approchant de cet orifice d'irrigation, dont l'influence est donc inexistante — ce qui se comprend puisque la tranchée d'étude s'arrête à 140 cm de ce point.

E. — *Bilan de l'incidence des différents traitements sur la distribution racinaire*

Le but de cette étude était de comparer les effets des différents traitements sur l'enracinement des pommiers et d'essayer de classer ces traitements en fonction d'un jugement sur la valeur des enracinements induits.

Pour faire cette classification, nous avons employé les courbes des figures 3, 4, 5 et 6.

Pour chaque série de courbes, nous avons choisi trois distances : proche, moyenne, éloignée. A chacune de ces distances et pour chaque traitement, nous avons affecté comme note l'ordonnée arrondie du point de la courbe correspondant à cette distance. Dans le cas des sommes de surface, cette ordonnée a été divisée d'un facteur 10 ; l'ensemble de ces notes est présenté dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Comparaison générale des traitements

	Charpente racinaire												Total	Système absorbant												Total
	Sol						Sous-sol							Sol						Sous-sol						
	P		M		E		P		M		E			P		M		E		P		M		E		
	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L		T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	
Sec	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	5	3	2	1	1	1	0	4	4	3	2	2	2	25
Aspersion ..	8	2	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	16	5	3	2	2	2	1	3	3	3	2	2	2	30
Unique	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	2	1	1	1	0	2	3	3	2	2	2	23
Double	3	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	7	2	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	31

P = proche (T : 30 cm tronc, L : 30 cm ligne) M = moyen (T : 80 cm tronc, L : 70 cm ligne) E = éloigné (T : 130 cm tronc, L : 110 cm ligne)

Les sommes de surface des sections de grosses racines sont représentatives de la vigueur de la charpente, et les densités de racines sont représentatives de la répartition du système absorbant. Les sommes des notations relatives à ces deux critères pour chaque traitement permettent une classification :

charpente :

— en première position : l'*aspersion*, qui induit une charpente superficielle mais très vigoureuse ;

— en deuxième position : le traitement *double*, qui induit une charpente plus faible mais bien répartie entre sol et sous-sol ;

le traitement qui *sec* induit une charpente faible et profonde ;

— en dernière position : le traitement *unique*, qui induit une très faible charpente superficielle.

système absorbant :

— c'est le traitement *double* qui se classe en tête pour l'intensité et la régularité de répartition du système absorbant ;

— le traitement *aspersion* donne un résultat comparable, avec une répartition plus superficielle ;

— le traitement *sec* vient en troisième position, avec une répartition profonde ;

— le traitement *unique* vient en dernière position.

F. — *Comparaison des ancrages*

Pour un arbre, la résistance à l'arrachage, donc la solidité de son ancrage, dépend du volume et de la cohésion du sol pesant directement sur les racines. En ne considérant que les grosses racines (diamètre $\geqslant$ 1 mm), on obtient une image simplifiée de ce volume appelé : indice de résistance morphologique au déracinement (HUGUET, 1973).

TABLEAU 3

Indices moyens d'ancrage exprimés en litres

	Sec		Aspersion		Unique		Double	
	$\bar{x}$	$\frac{\sigma}{\bar{x}}$ %	$\bar{x}$	$\frac{\sigma}{\bar{x}}$ %	$\bar{x}$	$\frac{\sigma}{\bar{x}}$ %	$\bar{x}$	$\frac{\sigma}{\bar{x}}$ %
Face interne	14,1	25	19,4	34	14,8	44	20,5	55
Face externe	34,5	15	33,2	27	14,7	14	28,0	55
Moyenne des deux faces	24,3		26,3		14,8		24,3	

$\bar{x}$ = moyenne des 3 observations.

$\frac{\sigma}{\bar{x}}$ = coefficient de variations.

Pour chaque profil et chaque face de tranchée, cet indice a été calculé. Nous rappelons que, pour une face, cet indice est la somme des volumes élémentaires calculés pour chaque section de grosse racine rencontrée, en multipliant le diamètre de la racine par sa profondeur et la distance par rapport au tronc de la classe où se situe cette section.

Pour une paroi étudiée, cet indice d'ancrage est révélateur de la puissance d'exploration de la charpente depuis le tronc, et de la solidité de l'enracinement (tabl. 3).

Les coefficients de variation calculés sur chaque groupe de 3 observations permettent de juger la dispersion des résultats. Statistiquement, les différences entre les indices d'ancrage selon les traitements ne sont pas significatives ; pour cette raison, seules quelques tendances sont signalées, dans la mesure où elles sont en accord avec les conclusions sur la distribution racinaire. Les indices de la face interne permettent de distinguer deux groupes de traitements : *sec* et *unique*, d'une part ; *double* et *aspersion* de l'autre, ces deux derniers traitements paraissant avoir une charpente nettement plus puissante. Les indices de la face externe permettent de distinguer le comportement du traitement *unique*, dont l'indice est beaucoup plus faible que ceux des trois autres traitements.

Si on examine l'évolution de cet indice entre la face interne et la face externe, il apparaît une stagnation pour le traitement *unique*, ce qui indique une forte diminution du nombre et du diamètre des grosses racines entre ces deux faces. Par contre, l'évolution de cet indice pour les traitements *sec* et *aspersion* révèle la croissance vigoureuse de la charpente racinaire induite par ces traitements dans cette zone. Le traitement *double* correspond à une situation intermédiaire.

G. — *Comparaison des indices de multiplication racinaire*

Le rapport du nombre moyen de sections de racines observées sur toute la face externe, dans un secteur angulaire donné, par le nombre de sections observées sur la face interne dans le même secteur constitue l'indice de multiplication racinaire (fig. 7).

A chaque indice moyen de multiplication racinaire d'un secteur est associé son coefficient de variation calculé sur les trois répétitions du même traitement.

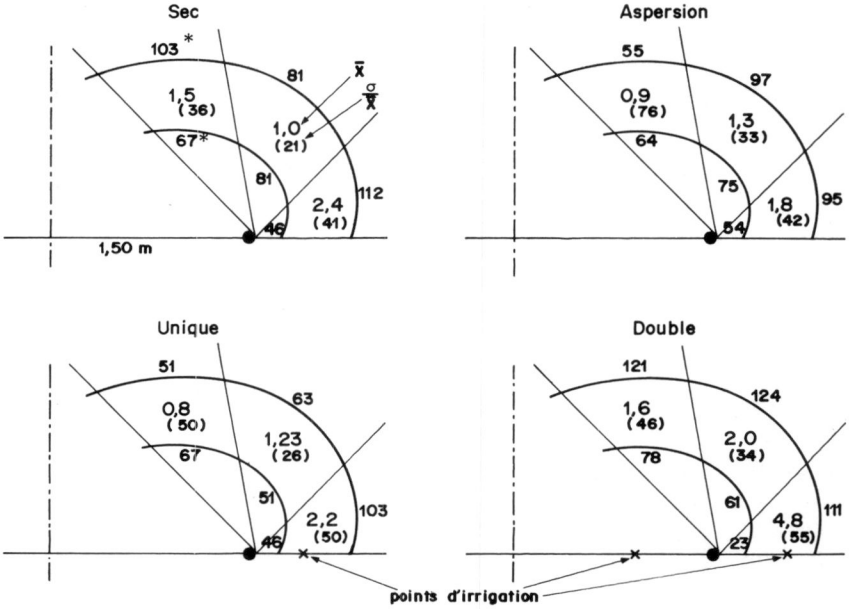
La forte dispersion des données relatives à un même traitement, matérialisée par les valeurs élevées des coefficients de variations, rend l'interprétation délicate et permet seulement d'émettre les hypothèses les plus compatibles avec les observations précédentes.

Par rapport au traitement *sec*, le traitement *aspersion* paraît surtout diminuer cet indice dans le secteur le plus éloigné du tronc, comme si l'approvisionnement régulier en eau tendait à diminuer l'activité racinaire lointaine.

Le traitement *double* induit une multiplication très active dans tous les secteurs. Dans le secteur le plus éloigné du tronc, l'indice de multiplication est le plus élevé par rapport aux indices du même secteur des autres traitements ; ce secteur, situé à plus d'un mètre des deux points d'irrigation, possède l'indice de multiplication le plus élevé ; il a, de plus, les fréquences absolues les plus fortes à cette distance. Pour ce traitement *double*, et dans ce secteur, les caractéristiques de l'enracinement sont très proches de celles du secteur homologue du traitement *sec*.

Le traitement *unique* se distingue, dans le secteur éloigné, par le plus faible

indice de multiplication avec les plus faibles fréquences absolues. Cette constatation vient appuyer l'hypothèse d'un affaiblissement induit par la saturation du sol à proximité du point d'irrigation, saturation déjà évoquée dans les paragraphes B I *d* et D.



$\bar{x}$: indice moyen pour les 3 observations * : Nombre moyen de racines observées sous ce secteur de spirale

$\frac{\sigma}{\bar{x}}$: Coefficient de variation

FIG. 7. — *Indice de multiplication racinaire*

III. — DISCUSSION

Cette étude a porté sur des arbres jeunes, qui n'avaient subi que pendant 2 ou 3 ans l'influence des différents traitements. Comme la variabilité naturelle des plantations pérennes est accentuée au niveau de la distribution racinaire sous l'influence des hétérogénéités du sol, il est déjà étonnant d'avoir pu déceler une adaptation des systèmes racinaires aux différents types d'irrigation.

Si l'on admet qu'un système racinaire est d'autant plus efficace qu'il explore avec intensité un plus grand volume de sol et qu'une charpente racinaire vigoureuse lui assure un bon ancrage, la comparaison des enracinements induits par les quatre traitements étudiés permet de tirer quelques enseignements.

1. — *Traitement sans irrigation*

A propos du traitement *sec*, il semble que la sécheresse n'ait pas été suffisamment rigoureuse pour entraîner un affaiblissement très net des arbres par rapport aux traitements irrigués. Ceci est dû à la fois à la profondeur du sol et à la succession

depuis la plantation de périodes estivales sans grosse chaleur avec une pluviométrie supérieure à la moyenne. En fait, ce concours de circonstances est assez heureux puisqu'il permet d'examiner l'enracinement d'arbres sans irrigation dans des conditions favorables à une survie par adaptation du système racinaire. Cette adaptation se traduit par une charpente avec des racines moins grosses au départ du tronc mais allant suffisamment loin et profond pour donner finalement un ancrage aussi puissant que celui des traitements bien irrigués. Cette adaptation se traduit aussi par une multiplication racinaire qui reste plus active à plus grande distance du tronc, le système absorbant exploitant surtout le sous-sol.

Le comportement racinaire induit par ce traitement sans irrigation fait ressortir les effets positifs d'un certain rationnement de l'eau sur l'installation des racines d'une jeune plantation.

2. — *Irrigation par aspersion*

A priori, le traitement *aspersion* peut paraître peu rationnel pour de jeunes arbres dont les racines sont loin d'exploiter l'ensemble du volume irrigué. Dans la mesure où le volume d'irrigation correspond au déficit hydrique de la parcelle, cela revient à ne fournir réellement aux arbres qu'une partie de leurs besoins. En fait, il y aurait gaspillage d'eau dans les zones non exploitées par les racines, et une humidité pas toujours suffisante dans les zones exploitées. Sous *aspersion*, on constate à partir du tronc une émission de grosses racines superficielles, ce qui, en définitive, donne l'ancrage global le plus solide. Le système absorbant est abondant mais exploite surtout le sol ; sa multiplication racinaire semble tamponnée par l'homogénéité de la répartition d'eau.

Le traitement *aspersion* conduit à un type d'enracinement très efficace, mais dont la forte adaptation entraîne la fragilité. Le système racinaire, superficiel et peu actif à distance, supportera très mal des périodes accidentelles de sécheresse ; l'exploitation des réserves minérales sera moins bonne. Paradoxalement, une homogénéité de la répartition d'eau paraît diminuer le volume de sol exploré.

3. — *Irrigation localisée en un point unique*

Le traitement avec, par arbre, un seul point d'irrigation situé à proximité du tronc, vient en dernière position dans toutes les comparaisons ; sa charpente racinaire et son ancrage sont les plus faibles, et son système absorbant est moins dense que celui du traitement sans irrigation.

Le fait que ce traitement ait été installé un an plus tard que les autres n'explique pas cette différence que l'on ne peut attribuer qu'à l'effet propre de ce système de localisation.

La fertilisation n'étant pas associée à l'irrigation, il est certain qu'un apport d'eau, au débit de 5 l/heure et localisé en un seul point, a pu avoir trois types de conséquences : un lessivage important des éléments minéraux hors de la portée des racines, la possibilité d'un excès d'eau près du collet de l'arbre avec risque d'asphyxie dans le sous-sol, un risque accru de perte d'eau par drainage.

Ces trois raisons agiraient dans une proportion indéterminée pour conduire à la faiblesse générale des systèmes racinaires induits par ce traitement.

4. — *Irrigation localisée en deux points symétriques*

Ce traitement conduit au développement d'un système racinaire présentant de nombreux avantages. La dimension des racines maîtresses est moindre que dans le cas de l'*aspersion* mais l'ancrage général reste solide. Ce traitement induit un système absorbant légèrement plus dense que l'*aspersion* — ce qui le classe en tête sous ce rapport — mais, contrairement à l'*aspersion*, ce traitement induit un système racinaire très bien réparti entre le sol et le sous-sol avec, de plus, une excellente homogénéité des densités racinaires quelle que soit la distance du tronc.

De plus, c'est pour ce traitement *double* que la multiplication racinaire est la plus active à toutes les distances, ce qui est une garantie au niveau de l'efficacité de l'absorption minérale, essentiellement liée aux zones de croissance active des racines.

Dans les conditions de cette expérience, ce traitement semble permettre de réunir les avantages du traitement *aspersion* et les aspects positifs de la non-irrigation.

Le type d'enracinement induit par ce traitement permet d'émettre l'hypothèse qu'un gradient d'humidité dégressif et symétrique par rapport au tronc est très favorable à une répartition efficace du système racinaire.

5. — *Influence des traitements sur la production de fruits*

A partir d'observations sur les parties aériennes, et en particulier les rendements, il apparaissait que le meilleur résultat et l'un des plus mauvais étaient dus respectivement aux deux systèmes d'irrigation localisée, le traitement *double* donnant en 1972 et 1973 une récolte moyenne d'environ 20 p. 100 supérieure au rendement de l'*aspersion*, tandis que le traitement *unique* donnait un rendement de 18 p. 100 inférieur — le rendement du traitement *sec* demeurant identique à celui du traitement *aspersion* (DUPRAT, 1975).

L'étude de l'enracinement fournit une explication à ces résultats difficilement interprétables, puisque la classification des traitements à partir des rendements se superpose remarquablement à l'échelle relative de la valeur des enracinements induits.

REMARQUE

Dans cette étude, pour les deux traitements en irrigation localisée nommés traitement *unique* et traitement *double*, les jugements portés sur les systèmes racinaires induits ne peuvent, en aucun cas, être transposés pour établir une hiérarchie de valeur entre les ajutages d'irrigation employés pour réaliser ces traitements. Que le traitement *unique* ait correspondu à un capillaire et le traitement *double* à deux goutteurs ne permet pas d'attribuer à l'un ou l'autre de ces types d'ajutage les effets observés sur l'enracinement, effets uniquement liés aux débits respectifs, au caractère symétrique ou unique des points d'irrigation localisée propres à un arbre, et à la distance relative du tronc — sans que l'on puisse, dans cet essai, distinguer les influences de chacun de ces facteurs dans les différences globales observées entre ces deux traitements.

Les résultats obtenus et les conclusions tirées se réfèrent uniquement à l'examen de l'enracinement, seul sujet de ce travail qui ne prétend pas être une étude générale des avantages et des inconvénients de l'irrigation localisée en arboriculture fruitière.

CONCLUSIONS

Cette étude a permis de comparer quantitativement et qualitativement les enracinements de jeunes pommiers *Golden* sans irrigation ou soumis à trois traitements correspondant à la localisation de plus en plus étroite de doses voisines d'irrigation : l'absence de localisation par aspersion, une localisation à partir de deux points symétriques par rapport au tronc, et enfin une localisation étroite à partir d'un seul point proche du tronc.

A la lumière des résultats obtenus, l'aspersion paraît une technique d'irrigation peu adaptée à un jeune verger par le gaspillage de l'eau répandue dans les zones non exploitées par les racines et par la limitation de l'enracinement en distance et en profondeur. Il semble également justifié de déconseiller une localisation très étroite à partir d'un seul ajutage proche du tronc. Cette méthode conduit à un type d'enracinement peu fourni, en induisant un affaiblissement du système racinaire par saturation dans la zone du collet, avec une répartition insuffisante de l'eau apportée.

Par contre, la double localisation symétrique par rapport au tronc est la méthode qui induit un enracinement plus dense et plus régulier, conduisant à une bonne exploration du sol et du sous-sol. Sur le seul critère de l'enracinement, cette méthode paraît très favorable en raison de la symétrie des ajutages par rapport au tronc, disposition adaptée à la symétrie du système racinaire. L'éloignement relatif de ces ajutages par rapport au tronc et leur débit modéré sont également des facteurs qui concourent à l'efficacité de cette méthode d'irrigation.

L'extrapolation de ces premiers résultats doit être prudente. Il y aurait lieu notamment en raison du caractère particulièrement pluvieux des trois années concernées d'étudier avec plus de précision l'influence de la position et des débits d'ajutages symétriques en fonction de l'âge, de la croissance et de la productivité des arbres. Il paraît alors probable que l'on puisse arriver à une sérieuse économie d'eau par rapport à l'irrigation par aspersion, puisque l'exploration racinaire dense et profonde permet également de bien tirer parti des réserves hydriques du sol.

Reçu pour publication en mai 1976.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre gratitude à M. VERNET qui nous a accueillis au domaine de Bordehaute et a assuré la réalisation matérielle des tranchées.

SUMMARY

INFLUENCE OF A LOCALIZED IRRIGATION ON THE ROOTING OF YOUNG APPLE-TREES

The rooting of young Golden apple-trees in a grass-grown orchard on a sand-clay soil are studied with the method based on the spiral trench. The results consist in qualitative and quantitative data which define the distribution of the root framework and absorbing system. Three

irrigation methods supply, with a more or less narrow localization, the same water volume corresponding to the potential evapotranspiration of the plot ; their effects are compared with those of a treatment without irrigation.

Under the experimental conditions, drench irrigation induces probably a water waste and limits the rooting to a superficial zone.

Localized irrigation carried out from a single place leads to a poor rooting which would result from a saturation and a leaching at the level of the tree collar. The high rate of the irrigation nozzle (5 l/h) and the too short distance (30 cm) between the trunk and the localization point would explain these consequences.

Localized irrigation with two irrigation places showing a moderate flow rate (2 l/h)and situated symetrically at 50 cm of the trunk induces a dense and regular rooting with a good penetration of the soil and sub-soil, as if a degressive and symetric moistening gradient with respect to the trunk was very favourable to an efficient distribution of the root system.

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS EINER LOKALISIERTEN BEWÄSSERUNG AUF DIE EINWURZELUNG VON JUNGEN APFELBAÜMEN

Die Einwurzelung von jungen Golden Apfelbaümen in einen grasbewachsenen Obstgarten auf sandlehmigen Boden ist mit der Methode des Spiralgrabens studiert. Die Ergebnisse bestehen aus qualitativen und quantitativen Daten, die die Verteilung des Wurzelgerüsts und des Saugssystems bestimmen.

Drei Bewässerungsmethoden liefern, mit einer mehr oder weniger engen Lokalisierung, dieselbe Wassermenge, die schätzungsweise der potentiellen Evapotranspiration der Parzelle entspricht ; ihre Folgen sind mit diesen einer Behandlung ohne Bewässerung verglichen.

Unter den Versuchsbedingungen führt vermutlich die Beregnung zu einer Wasserverschleuderung und beschränkt die Einwurzelung zu einer oberflächlichen Zone.

Lokalisierte Bewässerung aus einer einzigen Quelle führt zu einer schwächlichen Bewurzelung, die durch eine Sättigung und ein Auslaugen am Wellenbund bedingt wäre. Die hohe Abflussmenge der Bewässerungsdüse (5 l/Stunde) und die zu kleine Entfernung (30 Zentimeter) zwischen dem Stamm und der Lokalisierungsstelle könnten diese Folgen erklären.

Lokalisierte Bewässerung aus zwei Quellen mit mässiger Abflussmenge (2 l/Stunde), die symmetrisch 50 Zentimeter vom Stammm entfernt sind, erzeugt eine dichte und regelmässige Einwurzelung mit einem guten Vordringen des Bodens und Unterbodens, als ob ein degressiver und symmetrischer Feuchtigkeitsgradient hinsichtlich des Stammes für eine wirksame Verteilung des Wurzelsystems sehr günstig wäre.

РЕЗЮМЕ

Влияние локализированного орошения на укоренение молодых яблонь.

Ж. Г. ЮГЕ.

В саду засеянном травой, на глинисто-песчанной почве, изучалось укоренение молодых яблонь, сорта Гольден, с помощью метода спиральных траншей. Полученные качественные и количественные данные определяют распределение корневого остова и поглощающей системы.

С помощью трех разных методов более или менее локализированного орошения в почву вносился об' ем влаги, приблизительно соответствовавший потенциальной эвапотранспирации делянки, и эффект орошения сравнивался с неорошенным вариантом.

Орошение дождеванием вызывало вероятно в условиях опыта перерасход влаги, ибо этот способ ограничивал укорение только поверхностной зоной.

Орошение, локализированное в одном только пункте применения приводило к образованию чахлой корневой системы, вызванному насыщением и вымыванием в зоне кор невой шейки растения. Слишком сильный расход воды соплом оросительной системы (5 литров/час) и слишком маленькое расстояние (30 см.) между стволом и точкой локализации орошения, могут об' яснить эти последствия.

Орошение со средним расходом влаги (2 литра в час), симметрично локализированное в двух пунктах находившихся в 50-ти см. от ствола, приводило к регулярному и густому укоренению и хорошему прониканию корней в почву и под-почву, как, если-бы симметрический и дегрессивный градиент влажности по отношению к стволу, благоприятствовал эффективному распределению корневой системы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DUPRAT J., 1975. Journées d'information sur l'irrigation. Bordeaux, 27 et 28 mai. *Rapport C.T.G.R.E.F.*

HUGUET J. G., 1973. Nouvelle méthode d'étude de l'enracinement des végétaux pérennes à partir d'une tranchée spirale. *Ann. agron.* **24** (6), 707-731.

ROLLAND M., 1974. Irrigation localisée. *Compte rendu Coll. Nat. Bordeaux. I.N.V.U.F.L.E.C.*, Paris.

Ann. agron., 1976, **27** (3), 363-366.

CHRONIQUE DES LIVRES

HASLER (A. D.), 1975. — COUPLING OF LAND AND WATER SYSTEMS. — Collection Ecological studies, Jacobs J. *et al.*, ed., vol. 10, Springer Verlag, Berlin, 309 p.

Ce 10e volume de la collection « Ecological studies », reprend les textes de communications présentées au XVIIIe Congrès international de Limnologie, organisé à Leningrad (U.R.S.S.) par la Société internationale d'Écologie (INTECOL).

A l'intérieur d'un ensemble visant à restituer les bases de l'étude des cycles nutritionnels, au travers des interactions biologiques, chimiques, énergétiques et nutritionnelles entre les milieux terrestres et aquatiques (eaux douces), le présent congrès aborde, pour divers lieux géographiques et divers climats, les deux grands points suivants :

— aspects généraux des relations entre les bassins versants et les cours d'eau alimentant les lacs en éléments nutritifs, et bilans d'entrée-sortie des lacs artificiels ;

— études écologiques des systèmes de transition semi-aquatiques (tourbières, marécages, mangroves, zones littorales) : cycles nutritionnels et chaînes de consommation-production biologiques aux différents niveaux trophiques, en considérant le processus naturel d'eutrophisation et son accélération par les activités humaines urbaines ou agricoles, telles la fertilisation, la dégradation des sols et l'érosion résultante, le déversement des eaux résiduaires.

L'ouvrage comprend 18 communications regroupées en 12 sections. Un avant-propos et une courte préface en situent le contexte. Malheureusement l'absence d'un rapport de synthèse ou d'un chapitre de conclusion en altère le caractère de généralisation.

La présentation est, comme à l'accoutumée pour cette collection, agréable, claire, aérée. Un index matière clôt l'ouvrage.

Le sujet, certes très vaste, ne peut, aux dires du rédacteur, être épuisé en un seul volume et la vocation de l'ouvrage se restreint à un niveau d'introduction donnant les schémas conceptuels. Ce niveau d'introduction le fera apprécier d'un public assez large et le livre trouvera des lecteurs de tous niveaux, universitaires, enseignants, chercheurs, et d'horizons variés, du non-spécialiste intéressé au spécialiste concerné.

L. D.

CHARNES (A.), LYNN (W. R.), ed. — MATHEMATICAL ANALYSIS OF DECISION PROBLEMS IN ECOLOGY. — Proceeding of the N.A.T.O. Conference held in Istanbul, Turkey, July 9-13, 1973. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1975, 421 p. (Coll. Lecture notes in Biomathematics. Levin (S.) ed., vol. 5).

L'objectif de la Conférence du N.A.T.O. était de réunir un groupe de chercheurs des diverses disciplines concernées par les problèmes écologiques et de présenter les derniers progrès en matière de recherches mathématiques susceptibles d'aider à résoudre ces problèmes.

Les communications sont regroupées sous quatre chapitres :

A. — Problèmes de l'utilisation des sols.
B. — Contrôle de la pollution de l'eau, de l'air et des nuisances dues au bruit.
C. — Contrôle des maladies infectieuses.
D. — Analyses sociale et de comportement.

J. L.

CHOUARD (P.), BILDERLING (N. de), ed. — PHYTOTRONICS IN AGRICULTURAL AND HORTICULTURAL RESEARCH. PHYTOTRONICS III. — Paris, Gauthiers-Villars, 1975, 410 p. — (Coll. Formation permanente en écologie et biologie, Pesson (P.), dir.).

Le présent volume est le troisième consacré à la phytotronique. Il réunit les communications de trois sessions du XIXe Congrès d'Horticulture (Varsovie, septembre 1974), la 25e intitulée « Phytotrons en recherche horticole », la 42e « Climat des cultures protégées », et la 54e « Serres de verre et de plastique, équipement et utilisation ».

Les 55 communications en français ou en anglais sont regroupées sous ces trois chapitres. Elles sont précédées chacune d'un résumé dans l'autre langue.

J. L.

VAUGHAN (J. G.), MACLEOD (A. J.), JONES (B. M. G.), ed. — THE BIOLOGY AND CHEMISTRY OF THE CRUCIFERAE. — London, New York, San Francisco, Academic Press, 1976, 355 p.

Le présent ouvrage réunit les communications prononcées à Londres (7-9 janvier 1974) lors d'une conférence consacrée à la biologie des Crucifères, organisée par la Société Linnéenne de Londres et la Société Phytochimique.

Les communications ont été les suivantes :

HEDGE (I. C.). — Étude systématique et géographique des Crucifères de l'Ancien Monde.
MARBERD (D. J.). — Étude cytotaxonomique de *Brassica* et genres apparentés.
CRISP (P.). — Tendances dans l'amélioration et la culture des Crucifères.
VAUGHAN (J. G.), etc. — Étude des graines des Crucifères.
ROLLINS (R. C.), BANERJEE (U. C.). — Trichomes dans l'étude des Crucifères.
LAWRENCE (M. J.). — Variation dans des populations naturelles d'*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.
BJORKMAN (R.). — Propriétés et fonctions des myrosinases de plantes.
KJAER (A.). — Glucosinolates des Crucifères.
APPELQVIST (L. A.). — Lipides des Crucifères.
FINLAYSON (A. J.). — Teneur en protéines de graines de quelques Crucifères.
MACLEOD (A. J.). — Composés volatils des Crucifères.
HEYWOOD (V. H.). — Biologie et chimie des Crucifères. Conclusions générales.

J. L.

WILLIAMS (R. F.). — THE SHOOT APEX AND LEAF GROWTH. A STUDY IN QUANTITATIVE BIOLOGY. — Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1975, 256 p.

L'auteur présente une étude descriptive et quantitative de la croissance de la feuille et de l'apex chez diverses espèces cultivées. Il s'agit de travaux originaux à l'exception de ceux sur le Blé et le Trèfle, qui avaient, en partie, déjà fait l'objet de publications scientifiques.

Plan de l'ouvrage

1. — Introduction.
2. — Description quantitative de la croissance.
3. — Phyllotaxie.
   3. 1. — Spirale et autres systèmes phyllotaxiques.
   3. 2. — Paramètres de la phyllotaxie.
   3. 3. — L'angle de Fibonacci : irrationnel ou inévitable ?
4. — Systèmes apicaux végétatifs.
   4. 1. — Lin, *Linum usitatissimum* L.
   4. 2. — Tabac, *Nicotiana tabacum* L.
   4. 3. — Chou-fleur, *Brassica oleracea* L.
   4. 4. — Lupin bleu, *Lupinus angustifolius* L.
   4. 5. — Trèfle, *Trifolium subterraneum* L.
   4. 6. — Eucalyptus, *Eucalyptus grandis* HILL et MAIDEN, *Eucalyptus bicostata* MAIDEN, BLAKELY et SIMMONDS.

4. 7. — Blé, *Triticum aestivum* L.
4. 8. — Ficus, *Ficus elastica*.
4. 9. — *Ornithopus compressus* L., *Dianella* sp., *Acacia mucronata*, *Helianthus annuus* L.

5. — Dynamique de croissance de la feuille.
5. 1. — Trèfle.
5. 2. — Blé.
5. 3. — Vitesses relatives d'évolution R et G.

6. — Croissance de l'inflorescence.
7. — Croissance des talles de blé.
8. — Croissance végétale = terme d'intégration.
8. 1. — Contraintes physiques, facteurs déterminants de la vitesse de croissance.
8. 2. — Contrainte et morphogenèse.
8. 3. — Organisation des apex végétatifs.

Annexe :

A1. — Reconstruction tridimensionnelle.
A2. — Estimation du volume par la reconstruction en série.
A3. — Phyllotaxie.
A4. — Équivalence d'âge et covariance.
A5. — Traitement et présentation des données.
A6. — Comptage des cellules.
A7. — Table de conversion.

Les méthodes utilisées, classiquement connues et souvent estimées longues et fastidieuses ont été minutieusement appliquées : schémas de reconstruction tri-dimensionnelle (dus à l'auteur, 1970) ; estimation des volumes pour la reconstruction en série (Wilhelm His, 1888), analyse phyllotaxique (Arcy Wentworth Thompson, 1942). La méthode de reconstruction permet notamment de mesurer le volume de jeunes tissus aux premiers stades de leur croissance. Les reconstitutions d'apex sont illustrées de nombreux dessins, schémas, histogrammes et photographies.

A cette suite de chapitres sur la description d'apex succède une série de chapitres sur la dynamique de croissance, spécialement en fonction de l'évolution de la composition biochimique et en fonction des facteurs physiques de contrainte.

Après avoir constaté qu'un changement de composition de la matière sèche des cellules végétales de l'apex s'effectue rapidement en quelques jours, l'auteur expose les raisons de ces modifications. Il souligne l'importance des contraintes physiques comme élément déterminant de la vitesse de croissance végétale. Il propose des modèles géométriques de développement des systèmes apicaux.

Le Blé fait spécialement l'objet de chapitres particuliers, non seulement la description de l'apex, mais aussi l'étude de l'inflorescence et des talles.

Les méthodologies sont développées en annexe.

Une bibliographie abondante et un index auteurs-matière terminent l'ouvrage.

L'ouvrage est original par son sujet et constitue une source d'information importante. Il trouvera de nombreux lecteurs intéressés parmi les physiologistes, les botanistes, les agronomes et tous les biologistes en général.

L. D., M.-C. D.

Spedding (C. R. W.). — The biology of agricultural systems. — London, Academic Press, 1975, 261 p.

L'étude des systèmes de production agricole s'appuie sur différentes disciplines et peut être envisagée sous divers points de vue. Cet ouvrage traite essentiellement des aspects biologiques associés à ces systèmes et du rôle des cultures et des animaux, en ayant le souci constant d'une analyse globale des systèmes intégraux et de l'efficience des processus.

Il relate successivement :

— les finalités de production de l'agriculture aussi diverses que sources nutritionnelles de base, mais aussi ressources en matériaux variés : fibres végétales, laine, fourrures, cuirs, engrais, ressources énergétiques sous forme d'animaux de trait ou utilisés pour le transport ;

— étude des schémas des systèmes agricoles et leur fonctionnement, notamment par grande production ;

— étude des schémas des systèmes biologiques de type production primaire, production secondaire, écosystèmes, cycles énergétiques et flux de matières organiques ;

— les principes de production des cultures selon la finalité, les aires de cultures, les besoins énergétiques et l'efficience de cette énergie, les cycles végétatifs et les rendements finaux obtenus, les principales sources de protéines ;

— les principes de production zootechnique et les performances obtenues par grande production (lait, viande, cuirs...), les aliments et leur mécanisme d'assimilation, l'efficience de cette alimentation ;

— les types de récolte et les résultats obtenus ;

— les rendements du système (rentabilité de la production) et les « fuites » accidentelles épidémiologiques ou erreurs de conduites d'exploitation ;

— les grands modes de conduites d'exploitations agricoles sous divers climats sous l'appellation d'écosystèmes agricoles ;

— la place de l'agrobiologie et son impact dans la société humaine ;

— le rôle de la Recherche face à l'Agriculture.

Une annexe précise une des méthodologies d'étude employées (le diagramme circulaire) dans l'analyse des composantes des systèmes étudiés.

L'ouvrage se caractérise par la remarquable et abondante documentation illustrée (classifications, tableaux, schémas, diagrammes, cycles) qui concrétisent au mieux le texte et sans lesquels celui-ci resterait très hermétique.

Cet ouvrage par son originalité trouvera sa place, certes dans le domaine agronomique, mais aussi dans la compréhension des systèmes et l'analyse de leur fonctionnement.

L. D.

VAN DER MAREL (H. W.), BEUTELSPACHER (H.). — ATLAS OF INFRARED SPECTROSCOPY OF CLAY MINERALS AND THEIR ADMIXTURES. — Amsterdam, Elsevier, 1976, 396 p.

On dispose enfin d'un atlas où sont reproduits les spectres d'absorption infrarouge des principaux constituants minéraux et organiques des sols.

Le grand nombre d'enregistrements présentés confère à ce livre un intérêt tout particulier : en effet, à l'intérieur de chaque classe minéralogique définie par diffraction des RX, existent des échantillons dont les caractéristiques spectroscopiques diffèrent. Ce livre montre, de ce point de vue, l'extrême sensibilité de la spectroscopie infrarouge pour l'identification des constituants des sols. Il est, par conséquent, le complément nécessaire des atlas de diffraction des RX.

Le classement adopté pour présenter les enregistrements complets de 300 à 4 000 cm^{-1} est tout à fait classique. Il est bien connu des chercheurs qui étudient ces composés.

Le lecteur peut aisément compléter son information en se reportant à la bibliographie classée par sujet qui est présentée à la fin de l'ouvrage.

R. P.

Ann. agron., 1976, **27** (3).

CONTENTS

G. Pédro, A. Chauvel, A. J. Melfi. — Research work concerning the constitution and formation of the *Terra roxa estructurada* of Brazil. Introduction to the study of ferrallitic pedogenesis 265

J. Boiffin, M. Sebillotte. — Climate, structure stability and structure weathering. Attempt to analyse a soil behaviour in the field 295

R. Bonhomme, C. Varlet-Grancher. — Net assimilation, water use and microclimate of a maize canopy. VII. — Distribution of the red and far-red radiation 327

J. Morizet, M. Mingeau. — Influence of environment factors on water absorption. Study carried out on decapitated tomatoes under exsudation. II. — Physical factors and interactions with mineral nutrition 333

J. G. Huguet. — Influence of a localized irrigation on the rooting of young apple-trees .. 343

Books review 363

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé ;* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Agronomie.

annales agronomiques

Bimestriel

1976

Vol. 27. N° 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1976, **27** (4), 367-415

ÉTUDE DES INTERACTIONS MONTMORILLONITE CALCIQUE-EAU-DIOLS. HYDRATATION DES COMPLEXES MONTMORILLONITE-DIOLS [1]

I. — ÉTUDE DES COMPLEXES MONTMORILLONITE-EAU-DIOLS

P. CHASSIN

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Dans ce travail on a étudié les interactions spécifiques entre la montmorillonite calcique, l'eau et divers diols aliphatiques (éthanediol, propane 1-2 diol, propane 1-3 diol, butane 1-3 diol, butane 1-4 diol, butane 2-3 diol, di- et triéthylèneglycol).

L'analyse des isothermes d'adsorption d'eau et de diols par la montmorillonite, reposant sur le calcul des diagrammes de sélectivité, et l'utilisation des rayons X et de la spectroscopie infrarouge, permettent de prouver la présence d'une part, de complexes stables eau-diols dans les espaces interfoliaires, les caractéristiques de ces complexes dépendant de la structure de la molécule organique et, d'autre part, d'une phase interagrégat, de composition proche de la solution d'équilibre.

L'évaluation des énergies d'interactions cations compensateurs-molécules de diols et des liaisons hydrogène intermoléculaires permet d'expliquer les différents états d'équilibre observés avec les divers diols, notamment la composition de la phase adsorbée et des espacements interréticulaires de l'argile.

INTRODUCTION

Les associations entre les minéraux argileux et les composés organiques ont de très nombreuses conséquences qui se traduisent par une modification des propriétés physiques et biologiques des matrices minérales dans lesquelles elles apparaissent. C'est ainsi que ces associations sont couramment utilisées dans l'industrie

[1] Extrait d'une thèse de doctorat d'État soutenue à l'Université Pierre et Marie-Curie (Paris-VI), le 5 décembre 1975.

(CLEM et DOEHLER, 1963 ; MURRAY, 1963 ; NAHIN, 1963 ; THENG, 1970), notamment pour le renforcement des élastomères, l'amélioration des propriétés thermiques et de la résistance aux radiations des polymères, les fluides de forage dans l'industrie pétrolière (bentones), le « papier carbone » sans carbone...

La présence de matières organiques dans un sol se traduit par une amélioration de ses propriétés physiques (porosité, perméabilité, stabilité structurale) et une modification de ses propriétés d'hydratation. Cette dernière action de la matière organique revêt un intérêt fondamental pour ses conséquences pratiques, en particulier, en modifiant :

— la réserve en eau du sol, c'est-à-dire la quantité d'eau disponible pour la plante ;

— les propriétés mécaniques du sol (plasticité, compactage...) en changeant soit la quantité d'eau retenue, soit la distribution de l'eau dans la matrice minérale.

Un des objectifs essentiels pour la Science du Sol est donc l'étude de l'influence de la matière organique sur les propriétés d'hydratation des constituants minéraux des sols, notamment celles des argiles.

Malheureusement, la mauvaise définition physico-chimique des argiles de sol (présence de polyoxyhydroxydes de fer et d'aluminium) et des substances humiques (influence de l'agent d'extraction : WIESMULLER, 1965 ; FLAIG, 1970 ; FELBECK, 1971 ; complexité des molécules : HAWORTH, 1971 ; FELBECK, 1971 ; DE BORGER, 1972) rend l'étude de ces associations naturelles très difficile.

Cependant, pour appréhender le mode de fonctionnement de ces systèmes, une méthode d'approche consiste à étudier dans une première étape, une association modèle, puis à généraliser les résultats obtenus aux substances humiques.

Dans ce travail, on présentera essentiellement les propriétés d'hydratation de la montmorillonite de Camp Berteau contenant des quantités variables de diols (éthane 1,2 diol, propane 1,2 diol, propane 1,3 diol, butane 1,3 diol, butane 1,4 diol, butane 2,3 diol, diéthylèneglycol, triéthylèneglycol, polyéthylèneglycol 20 000). On a choisi la montmorillonite en raison de ses propriétés de sorption très marquées, et les diols car on sait d'une part, que les chaînes aliphatiques, portant des fonctions hydroxyles jouent un rôle important dans la fixation des composés humiques et, d'autre part, qu'ils sont capables de former des complexes stables avec l'eau et la montmorillonite.

Il est cependant connu que la fixation d'eau pour la montmorillonite peut se faire soit dans l'espace interfoliaire, soit dans l'espace interagrégat, c'est-à-dire dans le volume poral ménagé par les particules élémentaires (cf. chap. I). Sauf cas particuliers, la contribution de l'espace interfoliaire à l'adsorption reste limitée, notamment avec la montmorillonite calcique. Par contre, la contribution de l'espace interagrégat est beaucoup plus variable et dépend de nombreux paramètres tels que l'humidité relative, la présence ou l'absence de matières organiques...

Si l'on se rappelle que les propriétés physiques et structurales de la matrice minérale sont étroitement liées à ce que son volume poral contient, l'étude de l'influence de la matière organique sur les modalités de remplissage des espaces interfoliaire et interagrégat est très importante. On s'efforcera donc tout au long de ce travail, de définir les caractéristiques de l'absorption au niveau de ces deux compartiments, tant pour l'eau que pour le composé organique.

Il apparaît à peu près évident que les propriétés de l'argile contenant un produit organique vont dépendre de la réversibilité de l'adsorption du composé organique. En effet, les molécules organiques de petite taille, adsorbées de façon réversible (DOWDY, 1966), pourront se déplacer d'un compartiment à l'autre, alors que les macromolécules, adsorbées de façon irréversible par l'argile (SILBERBERG, 1962 *a* ; PARFITT et GREENLAND, 1970) seront bloquées au niveau de l'espace interfoliaire.

Le but de notre travail est d'étudier les modalités de répartition de l'eau et des molécules organiques dans les espaces interfoliaire et interagrégat. Pour ce faire, on a étudié l'hydratation de la montmorillonite calcique contenant des quantités variables de molécules organiques de structure et de taille différentes afin de favoriser la fixation interfoliaire ou interagrégat.

L'expérience montre que la quantité d'eau retenue par de tels systèmes n'est pas la somme des rétentions déterminées pour chaque composant pris séparément. Ainsi, quand la quantité de matière organique apportée croît, la rétention d'eau décroît, passe par une valeur minimale, puis augmente. A titre d'exemple, la fixation d'eau peut être diminuée de 80 p. 100 ou augmentée de 200 à 300 p. 100. Dans tous les cas, on jugera l'action d'une molécule organique en comparant la quantité d'eau fixée par ces systèmes à celle fixée par la montmorillonite calcique placée dans les mêmes conditions d'humidité mais ne contenant pas de matière organique.

En termes généraux, une propriété d'un mélange n'est pas une fonction linéaire de sa composition si des interactions spécifiques apparaissent entre les constituants : ici entre l'eau, l'argile et le composé organique. La compréhension de l'hydratation de la montmorillonite contenant un composé organique en plus ou moins grande quantité, nécessite donc la connaissance des interactions spécifiques entre les différents constituants et fera l'objet du chapitre III, les précédents traitant du protocole expérimental (chap. I) et de l'adsorption de l'eau et des composés organiques par les argiles (chap. II).

Pour atteindre notre objectif, on étudiera ensuite l'hydratation de l'argile contenant des quantités variables d'un de ces produits organiques (chap. IV) pour définir, en raisonnant par analogie, un modèle d'action de la matière organique dans les sols (chap. V).

CHAPITRE I

MATÉRIELS ET BASES EXPÉRIMENTALES

I. 1. — DÉFINITION DU MINÉRAL ÉTUDIÉ

Du point de vue morphologique, les montmorillonites se présentent sous forme de petites particules dont la plus grande dimension est généralement inférieure à un micron (LEONARD et LOW, 1964). Ces particules sont constituées d'un nombre variable de feuillets élémentaires, de l'ordre de dix pour une argile sodique (MERING, 1946). Ce nombre est d'ailleurs variable suivant la nature des ions qui saturent le minéral (BANIN et LAHAV, 1968).

Dans la majeure partie des expériences, la capacité d'échange de la montmorillonite est saturée par l'ion calcium.

1. 11. — *Caractéristiques minéralogiques de la montmorillonite de Camp Berteau*

La structure cristallographique des feuillets élémentaires a été décrite d'une façon très détaillée (GRIM, 1968 ; BROWN, 1961 ; GLAESER, 1953), et doit être représentée suivant le modèle proposé par HOFFMANN et HENDRICKS et non par celui de EDELMANN et FAVEJEE (GLAESER, 1953). Dans ce modèle (fig. 1), le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique centrale.

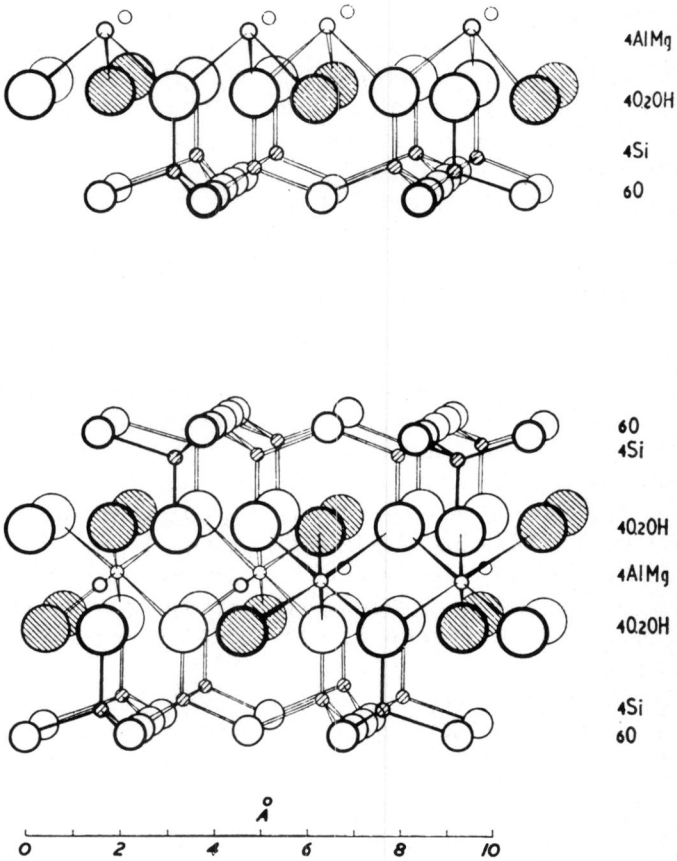


FIG. 1. — *Structure de la montmorillonite vue dans le plan 010* (BROWN, 1961)

A l'état anhydre, les feuillets sont accolés les uns aux autres, mais s'écartent en présence d'un composé polaire (eau, diols...) en révélant les surfaces internes et l'espace interfoliaire. On appellera phase interfoliaire la phase adsorbée dans l'espace interfoliaire (fig. 2).

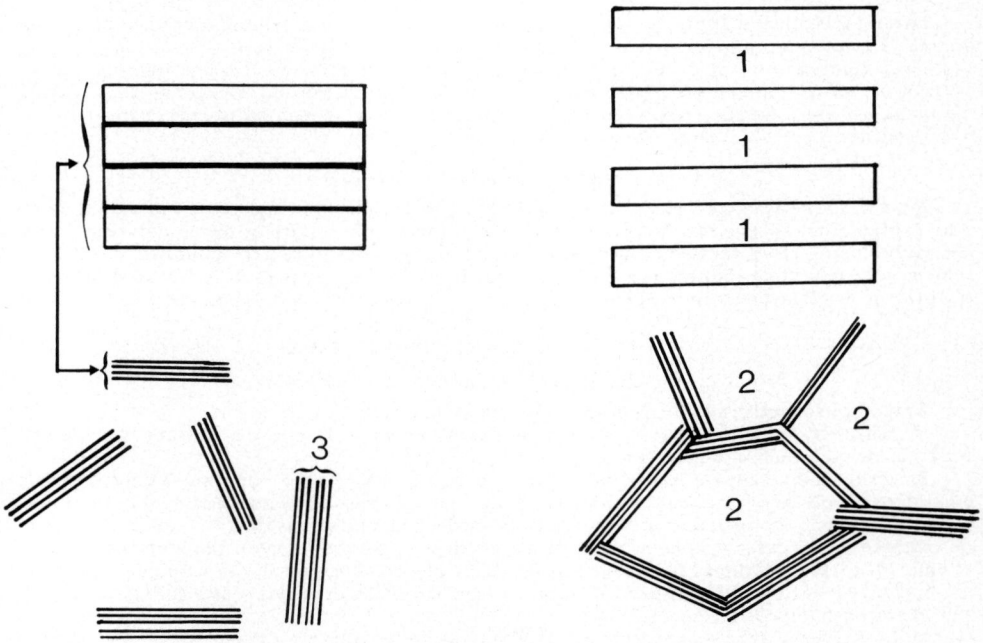
De plus, les particules élémentaires sont associées entre elles et ménagent un volume poral. Par analogie, on appellera phase interagrégat ou phase interparticulaire, la phase adsorbée dans le volume poral (fig. 2).

L'analyse totale de la fraction du minéral inférieure à deux microns conduit à la formule :

$$M^{+}_{0,39} \left[(Al^{3+}_{1,46} \; Fe^{3+}_{0,15}) \; Mg^{2+}_{0,39} \right] \left[Si_4 \right] O_{10} \, (OH)_2$$

Le déficit de charge résultant de la substitution isomorphique du magnésium à un cation trivalent dans la couche octaédrique, est compensé par la présence de cations interfoliaires symbolisés par M^+ dans la formule ci-dessus.

On appelle capacité d'échange la quantité de cations nécessaires pour compenser le déficit de charge. Dans le cas de la montmorillonite de Camp Berteau, elle est de 105 méq. pour 100 g de minéral séché à 130°C.



1 Espace interfoliaire

2 Espace interagregat ou espace interparticulaire

3 Particule élementaire

FIG. 2. — *Définition des espaces interfoliaire et interagrégat*

1. 12. — *Caractéristiques du volume poral de la montmorillonite calcique de Camp Berteau*

Les caractéristiques du volume poral, obtenues par adsorption d'azote à — 196°C, ont été réalisées par T. FERNANDEZ ALVAREZ que je remercie vivement.

TABLEAU I

Surface développée par les quatre catégories de pores trouvées sur la montmorillonite

Diamètre des pores	Surface développée
$d < 8$ Å	39 m²/g
8 Å $< d <$ 18 Å	15 m²/g
18 Å $< d <$ 50 Å	16 m²/g
$d > 50$ Å	46 m²/g

L'exploitation de l'isotherme d'adsorption d'azote conduit à une surface de 117 m²/g (méthode B.E.T.) ou de 116 m²/g (méthode du « *t* » plot de LIPPENS et DE BOER, 1965). Cette dernière méthode a également permis de calculer la surface développée par les pores (tabl. 1).

1. 13. — *Obtention et préparation du minéral*

La montmorillonite brute est purifiée par dispersion dans l'eau (élimination des sels et du quartz). La fraction inférieure à 2 μ est extraite par sédimentation.

Le minéral est préparé à l'état monoionique par agitation au contact d'une solution saline. L'excès de sel est éliminé par centrifugation et dialyse. La saturation exacte de la capacité d'échange est contrôlée par extraction de la totalité des cations compensateurs de la charge à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium normal.

1. 14. — *Conditionnement des échantillons*

Pour conduire les expériences, les échantillons sont des films obtenus par évaporation lente d'une suspension d'argile sur du mylar. Ces films autoporteurs serviront, soit à l'établissement des isothermes d'adsorption, soit à la spectroscopie infrarouge. D'autre part, pour mesurer l'espacement interfoliaire de l'argile par diffraction des rayons X, des dépôts d'environ 100 mg sont réalisés sur des lamelles couvre-objets de microscope, pesant environ 300 mg.

2. 2. — PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

1. 21. — *Cas des diols de faible poids moléculaire*

Trois types d'isothermes d'adsorption ont été obtenus, à 20°C, avec les films :

a) L'isotherme d'adsorption d'eau dans une atmosphère où la pression de vapeur d'eau est fixée par des solutions eau-acide sulfurique.

b) Un deuxième type d'isotherme est obtenu en plaçant l'argile dans une atmosphère en équilibre avec des solutions eau-diol. La tension de vapeur de tels mélanges est essentiellement due à l'eau car, à 20°C, les pressions de vapeur saturante des différents diols sont de l'ordre de 0,1 mm de mercure contre 17,5 mm pour l'eau. Il est donc nécessaire d'attendre plusieurs jours pour obtenir les états d'équilibre, les diols ne s'adsorbant que très lentement. On a supposé que l'on avait atteint l'état d'équilibre quand la masse et la composition de la phase adsorbée ne variaient plus de façon significative dans le temps.

c) Le troisième type d'isotherme est obtenu dans des conditions analogues aux précédentes (conditions *b*) mais où l'argile est, préalablement, plus ou moins enrichie en matière organique. Par la suite, nous appellerons ces échantillons « prétraités » par opposition aux autres non traités (conditions *b*). Avec les diols de faible poids moléculaire, le prétraitement a été réalisé de la façon suivante : après avoir fait adsorber, à partir de vapeurs de diol étudié, des quantités supérieures à celles que l'on désire, on réalise une désorption du produit organique par chauffage à 60°C.

1. 211. *Détermination des caractéristiques de la phase adsorbée.*

Toutes les isothermes ont été réalisées à 20°C dans des dessicateurs. Pour chaque point de l'isotherme, on détermine, sur quatre échantillons d'environ 200 mg, la masse et la composition de la phase adsorbée. La pesée des échantillons permet d'obtenir la somme des quantités d'eau et de diol adsorbées.

Sur chaque échantillon, la quantité diol adsorbée est déterminée par dosage et la quantité d'eau est évaluée par différence.

1. 212. — *Dosage du diol.*

Après la pesée, les échantillons sont immergés dans une quantité d'eau telle que la concentration en diol soit comprise entre 0,5 et 1 mg par cm³ de solution afin que le dosage ultérieur du diol, par oxydation sulfochromique, s'effectue dans de bonnes conditions.

La suspension obtenue après agitation est floculée par 0,5 cm³ d'acide sulfurique N et centrifugée, 5 cm³ de surnageant sont prélevés et mélangés à 10 cm³ d'une solution sulfochromique de composition : 11,768 g de $K_2Cr_2O_7$, 1 000 g d'acide sulfurique par litre (solution oxydante de normalité 0,24 N).

Après réduction du bichromate par le diol, on ajuste tous les volumes à 50 cm³ et on mesure la densité optique à 5 840 Å (absorption due aux ions Cr^{3+}) avec des cuves de 3 cm d'épaisseur.

a) *Validité du dosage.*

Pour un diol donné, cette méthode n'a de sens que si :

— le stade final de l'oxydation est indépendant de la concentration en produit organique et de la température. Différentes expériences montrent que la densité optique est proportionnelle à la quantité de produit apportée et indépendante de la température d'oxydation (fig. 3) ;

— tout le produit organique adsorbé sur l'argile est dosé. Les quantités ainsi déterminées sont égales à celles obtenues avec un analyseur de carbone où l'oxydation de la matière organique est réalisée à 700°C dans un courant d'oxygène.

On s'est également assuré qu'une argile dépourvue de matière organique, ainsi que l'eau utilisée, n'entraînaient pas de réduction appréciable du bichromate. Dans toutes les déterminations de la densité optique, on a pris la solution sulfochromique diluée cinq fois comme à blanc.

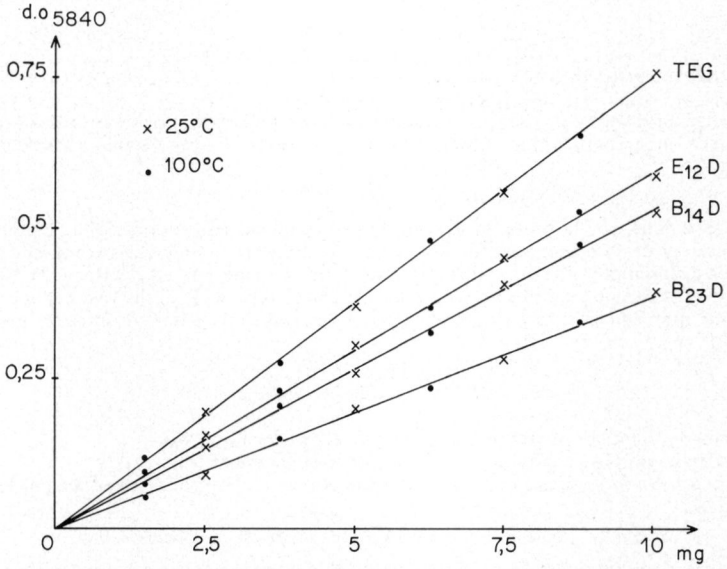


FIG. 3. — *Densité optique obtenue après une oxydation sulfochromique de divers diols*

b) *Précision du dosage du diol et erreur commise sur la fraction molaire adsorbée.*

La quantité Q de diol adsorbé est donnée par :

$$Q = \frac{d.o.}{k} \times \frac{V_1}{V_2}$$

où
- *d.o.* : densité optique à 5 840 Å ;
- k : coefficient angulaire de la droite donnant la densité optique en fonction de la quantité de matière organique apportée ;
- V_1 : volume initial de la solution ;
- V_2 : volume prélevé pour l'oxydation sulfochromique ($V_2 = 5$ cm³).

Pour connaître l'erreur sur Q, on peut, soit estimer les erreurs maximales commises sur chaque terme, soit calculer l'écart-type sur une série de dosages. Par cette deuxième méthode, on trouve $\sigma = 0{,}25$ p. 100, c'est-à-dire que 95 p. 100 des déterminations seront comprises entre $\pm$ 0,5 p. 100.

Bien que cette méthode de dosage du diol soit assez précise, l'erreur commise sur la quantité d'eau adsorbée et, par voie de conséquence, sur la fraction molaire adsorbée, peut être importante, quand la phase présente sur l'argile est riche en produit organique. En effet, la masse d'eau Q_1 est égale à :

$$Q_1 = Q_T - Q_A - Q_D$$

où
- Q_T : masse totale de l'échantillon déterminée par pesée,
- Q_A : masse d'argile,
- Q_D : masse de diol,

et

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_T + \Delta Q_A + \Delta Q_D$$

$$\Delta Q_2 = Q_T \frac{\Delta Q_T}{Q_T} + Q_A \frac{\Delta Q_A}{Q_A} + Q_D \frac{\Delta Q_D}{Q_D}$$

d'où

$$\Delta Q_1 = \varepsilon + Q_A \frac{1}{100} + Q_D \frac{0{,}5}{100}$$

Supposons, à titre d'exemple, que :
- la phase adsorbée contienne 95 p. 100 d'éthane 1,2 diol,
- $Q_A = 200$ mg,
- $Q_D = 50$ mg,

d'où

$$Q_1 = 2{,}5 \text{ mg},$$

et

$$\Delta Q_1 = 2 \text{ mg} + 0{,}25 \text{ mg} = 2{,}25 \text{ mg}.$$

La fraction molaire adsorbée sera donc comprise entre :

$$0{,}753 < 0{,}853 < 0{,}983$$

soit une erreur d'environ 15 p. 100 sur la fraction molaire adsorbée. Pour éviter des erreurs d'une telle importance, on a augmenté le nombre de déterminations dès que l'erreur prévue par le calcul dépassait 4 p. 100.

1. 213. *Propriétés des solutions utilisées.*

On a déjà signalé que la pression de vapeur des solutions eau-diol est essentiellement due à l'eau. Les mesures de pression effectuées avec un manomètre à huile montrent que la pression de vapeur des différentes solutions utilisées dans ce travail suit une loi de RAOULT. Ces résultats sont d'ailleurs en très bon accord avec ceux de GALLANT (1967 *a*, *b*) et de WELLISCH *et al.* (1961).

Il s'ensuit que l'on pourra caractériser toutes les solutions par leur fraction molaire x_s en composé a :

$$x_s = \frac{m_a/M_a}{m_a/M_a + m_b/M_b}$$

où :

m_a : poids du composé a caractérisé par un poids moléculaire M_a ;

m_b : poids du composé b caractérisé par un poids moléculaire M_b.

Sauf indications contraires, on caractérisera la solution et la phase adsorbée par leur fraction molaire en diol.

1. 22. — *Cas des polyéthylèneglycols de poids moléculaire élevé*

Dans ce cas, tout transfert de produit organique par voie gazeuse est impossible par suite de leur très faible tension de vapeur. L'obtention des isothermes d'adsorption est donc beaucoup plus aisée puisqu'un échantillon sert pour toutes les humidités relatives.

Expérimentalement, les films d'argile contenant des quantités variables de polyéthylèneglycols sont accrochés à l'extrémité de spirales de quartz placées dans des tubes de verre où la pression de vapeur est contrôlée par des solutions eau-acide sulfurique (fig. 4). Les quantités d'eau adsorbées sont déterminées à partir de l'allongement du ressort mesuré avec un cathétomètre.

1. 3. — TECHNIQUES UTILISÉES

On a déterminé, en plus des isothermes d'adsorption, les distances interréticulaires (diffraction des rayons X) et les spectres infrarouges des complexes.

1. 31. — *Diffraction des rayons X*

Les espacements interfoliaires ont été déterminés sur les dépôts d'argile pour favoriser les phénomènes de diffraction ool par suite de l'orientation préférentielle des particules.

Avec les argiles, on peut obtenir, soit des diagrammes rationnels où tous les ordres de diffraction sont un sous multiple du 1er ordre, soit des diagrammes irrationnels où les distances interréticulaires calculées ne sont pas des sous-multiples du 1er ordre. Dans le premier cas, la distance interréticulaire est constante d'un feuillet à l'autre alors que, dans le deuxième cas, on est en présence d'une répartition au hasard de deux ou plusieurs espacements interréticulaires. Dans ce dernier cas, on dit que l'on a un complexe d'interstratification.

L'analyse d'un complexe d'interstratification (mode de répartition, pourcentage de chaque composant) peut être envisagée directement à partir de la position et de l'intensité des pics de diffraction (MAC EWAN, 1956), mais le calcul n'est significatif que pour un nombre de pics assez élevé. Les échantillons interstratifiés de montmorillonite donnant, au plus, cinq réflexions basales, il faut recourir à une méthode indirecte.

HENDRICKS et TELLER (1942) ont proposé des formules qui permettent de prévoir l'effet d'un mélange de deux composants d'équidistance différente sur les intensités des phénomènes de diffraction. Avec la montmorillonite, la précision de la détermination des pourcentages des deux constituants est assez faible. Il n'en reste pas moins que l'ordre de grandeur de ces pourcentages est une indication précieuse.

1. 32. — *Spectroscopie infrarouge*

Les spectres infrarouges effectués sur des films autoporteurs ont été réalisés avec un spectromètre Beckmann IR 7. La cellule utilisée permet de faire le vide, de deutérer l'échantillon et de maintenir une atmosphère contrôlée.

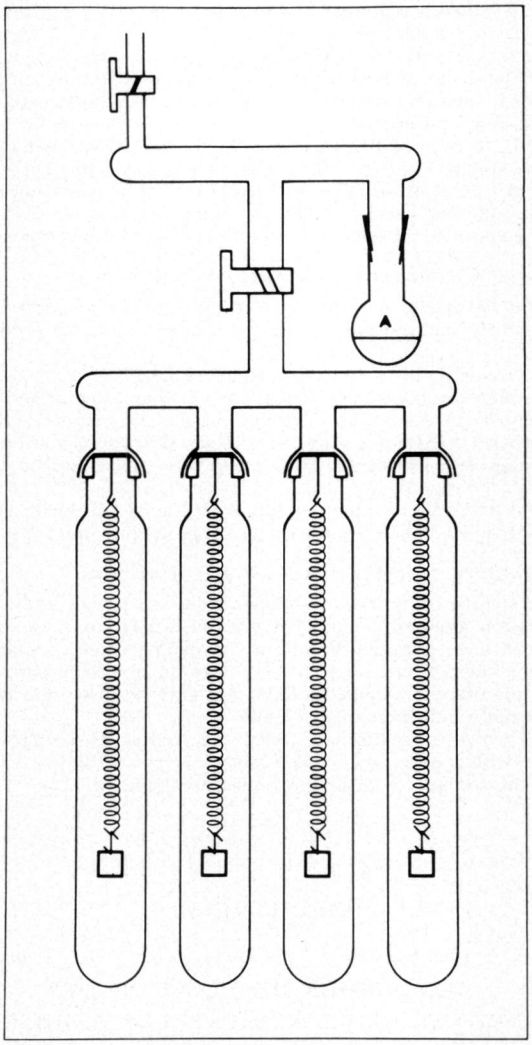


FIG. 4. — *Schéma du montage utilisé pour déterminer les isothermes d'adsorption d'eau de la montmorillonite calcique contenant du polyéthylèneglycol*

Dans ce travail, on a eu recours à la spectroscopie infrarouge pour caractériser les différents états de l'eau et du diol adsorbés sur l'argile. Ces déterminations sont parfois difficiles car plusieurs absorptions peuvent se superposer dans un même domaine spectral. On exposera donc successivement les principales difficultés rencontrées et les solutions apportées pour les pallier.

1. 321. *Vibrations de valence de l'eau et des hydroxyles des diols.*

Dans cette région, l'obtention directe des absorptions infrarouges est impossible par suite d'une forte absorption infrarouge, à 3 620 cm^{-1}, des hydroxyles de constitution de l'argile. Toutefois, ces derniers ne se deutérant pas à la température ambiante, on étudiera l'absorption dans la région des OD située entre 2 400 et 2 700 cm^{-1}.

Malheureusement, dans cette région, l'absorption infrarouge a pour origine l'eau et le diol adsorbés. Pour estimer leur contribution respective, on enregistre les spectres des complexes

hydratés et anhydres, la différence donnant l'absorption due aux vibrations de valence de l'eau. Cette méthode d'obtention des spectres suppose donc que :

— le produit organique reste en totalité sur l'échantillon pendant la dessiccation obtenue par mise sous vide. Cette condition est pratiquement réalisée car les cinétiques de désorption sont très différentes. D'ailleurs, on n'observe pas de diminution d'intensité de la bande d'absorption due aux vibrations de valence CH_2 ;

— la désorption d'eau ne modifie pas le spectre d'absorption des hydroxyles du diol. Bien que cette condition ne soit pas entièrement réalisée, on supposera que le spectre du complexe anhydre est représentatif de celui de l'état hydraté. Cette approximation est parfaitement légitime car on montrera que les liaisons hydrogène intermoléculaires diol-eau sont remplacées par des liaisons hydrogène intermoléculaires diol-diol d'énergie très voisines.

1. 322. *Vibrations de déformation angulaire H_2O et HOD.*

L'eau adsorbée sur les argiles présente une absorption due aux vibrations de déformation angulaire vers 1 640 cm^{-1}. Dans notre cas, aucune absorption due au produit organique n'apparaît dans cette région.

Dans le cadre de l'étude de l'eau adsorbée sur les argiles, PROST (1975) a montré que l'étude de l'absorption infrarouge des molécules d'eau partiellement deutérées (HOD) apportait des indications très précieuses. Là encore, l'absorption due aux vibrations de déformation angulaire HOD venant se superposer à celle des radicaux CH_2 ou CH_3 (déformation angulaire, wagging), on est obligé de travailler par différence entre les spectres des complexes non deutérés et partiellement deutérés.

Dans ce cas et pour avoir une bonne précision, il est important d'exécuter les enregistrements à faible vitesse car les bandes d'absorption CH_2 ou CH_3 sont plus fines que celles de HOD.

1. 323. *Déroulement chronologique des différents enregistrements.*

Dans un premier temps, on détermine le spectre du complexe hydraté dans la région des vibrations de déformation angulaire (1 300-1 800 cm^{-1}) à faible vitesse. Ce spectre permet de déterminer l'absorption infrarouge due aux vibrations de déformation angulaire de l'eau adsorbée.

Dans un deuxième temps, on enregistre le spectre du complexe partiellement deutéré dans les mêmes conditions que précédemment. La différence entre les deux spectres donne l'absorption due aux vibrations de déformation angulaire HOD.

Dans un troisième temps, on réalise les spectres des complexes deutérés hydratés et anhydres dans la région des vibrations de valence (2 000-3 000 cm^{-1}). La différence entre ces deux spectres donnera l'absorption infrarouge due aux vibrations de valence de D_2O.

CHAPITRE II

MÉCANISMES DE FIXATION DES COMPOSÉS POLAIRES PAR LES ARGILES

Dans ce chapitre, on présentera succinctement les résultats acquis sur l'adsorption de l'eau et des composés organiques polaires par les argiles. On se limitera volontairement aux conclusions qui seront utilisées dans ce travail.

2. 1. — FIXATION DE L'EAU PAR LES ARGILES

De nombreux travaux ont été consacrés à l'adsorption de l'eau par les argiles et différents modèles d'arrangement des molécules d'eau ont été proposés (HENDRICKS et JEFFERSON, 1938 ; MACEY, 1942 ; MAMY, 1968, 1972, 1970). Deux faits importants caractérisent l'hydratation des argiles :

— les modalités de l'adsorption sont étroitement liées à la nature du cation compensateur (MOONEY *et al.*, 1952 *a*, *b* ; ORCHISTON, 1955 ; MAMY, 1968 ; CALVET, 1972). Ainsi, les quantités d'eau fixées à une humidité relative donnée, croissent avec l'énergie d'hydratation des cations compensateurs de la charge ;

— la déshydratation de la montmorillonite calcique observée par analyse thermique différentielle s'effectue en trois étapes (HENDRICKS *et al.*, 1940).

Pour expliquer ces observations, il est admis que peuvent coexister sur les argiles trois types d'eau :

— *l'eau de solvatation des cations* : ce sont les molécules les plus proches des cations compensateurs. Dans ce cas, les interactions dominantes sont du type cation-dipôle ;

— *l'eau de remplissage* : ce sont les molécules d'eau adsorbées sur les molécules de solvatation des cations par formation de liaisons hydrogène. Ces deux types d'eau constituent, sur les argiles, l'eau interfoliaire ;

— *l'eau externe* : ce sont les molécules adsorbées sur les surfaces externes de l'argile. Dans ce cas, il est admis que les interactions dominantes sont du type liaisons hydrogène.

Récemment, PROST (1975) a pu caractériser, par spectroscopie infrarouge, les différentes étapes de l'hydratation des argiles et les états de l'eau correspondants. En particulier, deux grands types de résultats ont été observés sur l'hectorite calcique :

● Aux faibles teneurs en eau (environ 5 p. 100), l'absorption infrarouge de l'eau, observée dans la région des vibrations de valence, est composée de :

a) deux bandes haute fréquence correspondant aux vibrations de valence symétriques et antisymétriques des molécules d'eau de solvatation de cations. Celles-ci ont la symétrie C_{2V} et ne sont pas engagées dans des liaisons hydrogène ;

b) une bande basse fréquence due aux molécules d'eau localisées sur les surfaces externes. Dans ce cas, les molécules ont une symétrie C_{2V} et sont engagées dans des liaisons hydrogène.

● Aux teneurs en eau plus élevées (environ 15 p. 100), l'absorption infrarouge est encore composée de deux bandes haute fréquence et d'une bande basse fréquence. Toutefois, l'origine de ces bandes est différente, car les molécules d'eau interfoliaires ont une symétrie C_s par suite de l'établissement de liaisons hydrogène asymétriques. Dans ce cas, ce sont les hydroxyles engagés dans la liaison hydrogène la plus faible qui sont responsables de l'absorption haute fréquence, les hydroxyles appartenant aux molécules d'eau de solvatation des cations vibrant à plus basse fréquence que ceux appartenant aux molécules d'eau de remplissage.

A ces teneurs en eau, l'absorption basse fréquence est provoquée, d'une part par les molécules d'eau localisées sur les surfaces externes et engagées dans des liaisons hydrogène (symétrie C_{2V}) et, d'autre part par les hydroxyles des molécules d'eau interfoliaires ayant contracté la liaison hydrogène la plus intense.

2. 2. — ADSORPTION DES COMPOSÉS ORGANIQUES POLAIRES PAR LA MONTMORILLONITE

Ces dernières années, plusieurs revues bibliographiques ont été consacrées aux associations argile-composés organiques, couramment appelées « complexes organiques des argiles » (GREENLAND, 1965 *a*, *b*, 1971 ; MORTLAND, 1970 ; BRINDLEY, 1970 ; THENG, 1970, 1971 et 1974 ; CLOOS, 1972 ; CALVET et CHASSIN, 1973).

On a résumé dans les tableaux 2 et 3 les forces qui sont à l'origine de la formation des complexes organiques des argiles et les facteurs qui peuvent affecter l'adsorption.

TABLEAU 2

Forces mises en jeu dans la formation des complexes organiques des argiles
(CALVET et CHASSIN, 1973)

Forces polaires		
– interactions charge - charge entre	....	cations organiques et la surface chargée négativement anions organiques et les charges positives sur la surface
– interactions charge - dipôle (induit ou permanent) – interactions dipôle - dipôle (induits ou permanents) – liaison hydrogène Forces non polaires ou forces de dispersion ou forces de Van der Waals-London	entre	la surface et le composé organique les molécules organiques adsorbées (interactions intermoléculaires) les molécules organiques et l'eau

TABLEAU 3

Liste des principaux facteurs qui peuvent influencer l'adsorption des composés organiques par les argiles (CALVET et CHASSIN, 1973)

Propriétés du minéral	Propriétés des composés organiques	Propriétés du milieu d'obtention du complexe
Surface spécifique Charges de surface – origine – densité – distribution Nature des atomes formant la surface (OH ou O) Nature du cation compensateur Accessibilité de la surface – argile dispersée ou agrégée – taille des pores (agrégat ou argile fibreuse) État d'hydratation de la surface	Charge Taille Polarité Polarisabilité Forme Flexibilité	Nature du solvant qui peut faire varier : – la charge du composé – la solubilité du composé – la compétition entre le solvant et la matière organique au niveau des sites d'adsorption – l'état d'hydratation de l'argile

Il apparaît toutefois utile de faire trois remarques :

— *distinction entre molécules chargées et molécules neutres* : toutes les interactions mentionnées dans le tableau 2 peuvent, d'une part exister simultanément et, d'autre part jouer un rôle, même quand l'adsorption se fait par échange d'ions. Dans ce cas, cependant, l'énergie d'interaction entre la charge positive du cation organique et la charge négative de l'argile est bien plus grande que les énergies correspondant aux autres types d'interaction. Il en résulte que pour l'adsorption des cations organiques, les dipôles, les liaisons hydrogène, les liaisons π... peuvent être négligées ; ce qui n'est plus possible quand le composé organique n'est pas ionisé ;

— *variations des mécanismes d'adsorption en fonction des conditions physico-chimiques du milieu* : l'adsorption de la morpholine sur la montmorillonite calcique est, à cet égard, un très bon exemple (BRINDLEY, 1972). Ainsi, quand le pH est inférieur à 6, le composé organique est uniquement adsorbé sous forme de cations. Pour des pH compris entre 6 et 12, les molécules peuvent se fixer, sous forme de cations ou non (formation d'hémisels, interactions cation-dipôle). Au-delà de pH 12, les molécules s'adsorbent uniquement sous une forme non ionisée ;

— *rôle de l'eau* : dans la formation des complexes organiques des argiles, l'eau adsorbée peut jouer un rôle important. C'est ainsi qu'elle intervient dans la fixation des urées et des amides en fournissant des protons (MORTLAND, 1970 ; CRUZ *et al.*, 1968), de la pyridine, en établissant des liaisons hydrogène (FARMER et MORTLAND, 1966 ; YARIV *et al.*, 1966), ou des polyéthylène-glycols en provoquant, par sa désorption, des variations importantes d'entropie (PARFITT et GREENLAND, 1970).

2. 21. — *Cas des diols de faible poids moléculaire*

Dans cette partie, on fera souvent appel aux complexes silicates-éthane 1,2 diol, car ils ont fait l'objet de nombreux travaux par suite de leur grande utilisation pour caractériser les minéraux argileux.

Les comportements similaires des argiles solvatées par l'eau ou l'éthane 1,2 diol ont amené à définir les mêmes états adsorbés, à savoir :

— des molécules de solvatation des cations,

— des molécules de remplissage retenues par liaisons hydrogène intermoléculaires,

— des molécules « externes » retenues sur les surfaces externes de l'argile.

Les différentes études réalisées sur ces complexes par diffraction des rayons X et spectroscopie infrarouge, confirment cette interprétation.

2. 211. *Diffraction des rayons X.*

Les travaux effectués par BRADLEY *et al.* (1963) sur les complexes vermiculite de llano-éthane 1,2 diol, montrent que (fig. 5) :

— le plan de la chaîne carbonée est perpendiculaire au plan *a*, *b* du feuillet ;

— les groupes hydroxyles sont en interaction avec les cations compensateurs ;
— la molécule adopte une conformation « *trans* » ;
— le nombre de molécules par maille cristalline est de 2.

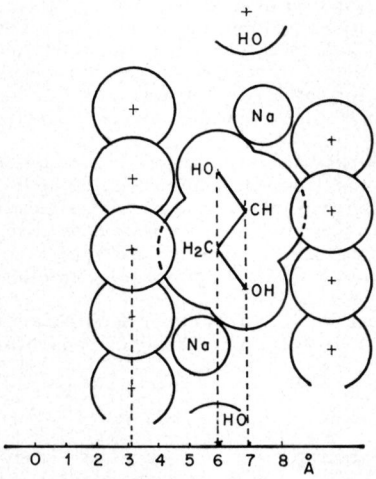


FIG. 5. — *Structure du complexe vermiculite llano-éthane 1-2 diol* (BRADLEY *et al.*, 1963)

Dans un autre travail, REYNOLDS (1965) détermine la structure des complexes montmorillonite calcique-éthane 1,2 diol. L'analyse des densités électroniques obtenue sur un nombre restreint de raies de diffraction, indique que (fig. 6) :

— le plan de symétrie moléculaire est perpendiculaire au plan *a*, *b* du feuillet ;
— la deuxième couche est déplacée selon l'axe *b* d'un demi-diamètre d'atome d'oxygène ;
— l'ensemble calcium-eau résiduelle est situé entre les deux couches d'éthane 1,2 diol, mais de part et d'autre du plan médian.

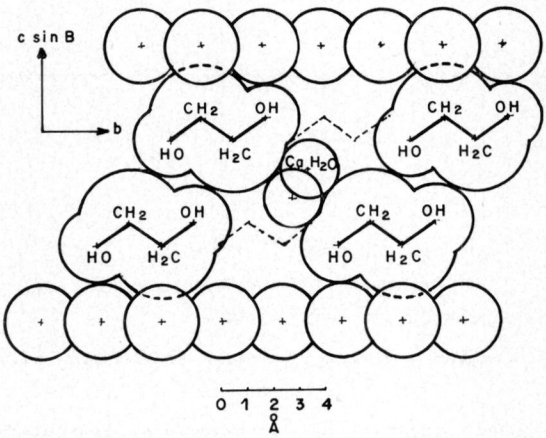


FIG. 6. — *Structure du complexe montmorillonite calcique-éthane 1-2 diol* (REYNOLDS, 1965)

On peut cependant penser que cette structure, équivalente à celle donnée par BRADLEY *et al.* (1963), n'est pas tout à fait correcte. En effet, l'analyse des modes normaux de vibration des radicaux CH_2, montre que la symétrie moléculaire de l'éthane 1,2 diol adsorbé sur les argiles, est C_2 (forme gauche) (CHASSIN, 1971). Cette observation n'est toutefois pas suffisante pour changer de façon fondamentale le modèle proposé par REYNOLDS.

2. 212. *Spectroscopie infrarouge.*

DOWDY (1966) a étudié par spectroscopie infrarouge les interactions entre l'eau et l'éthane 1,2 diol adsorbés sur la montmorillonite. En utilisant différents cations compensateurs de la charge (Ca^{2+}, Al^{3+}, Cu^{2+}), cet auteur a montré :

— qu'une fraction des hydroxyles est coordonnée aux cations compensateurs alors que l'autre contracte des liaisons hydrogène. Toutefois, aucun élément ne permet de préciser s'il s'agit de liaisons hydrogène inter ou intramoléculaire (DOWDY et MORTLAND, 1968) ;

— que la présence de liaisons hydrogène entre les radicaux CH_2 et les atomes d'oxygène du réseau postulées par BRADLEY (1945), MACEWAN (1948), TALIBUDEN (1955) et GREENLAND (1965 *a*), est peu probable.

Pour connaître la nature des liaisons hydrogène contractées par les diols adsorbés sur les argiles, on a étudié l'évolution de l'absorption infrarouge des hydroxyles quand le taux de recouvrement des surfaces varie. En utilisant l'éthane 1,2 diol, le propane 1,2 diol et le propane 1,3 diol, on a pu montrer que des liaisons hydrogène intramoléculaires apparaissent, au détriment des liaisons hydrogène intermoléculaires, quand le taux de recouvrement des surfaces diminuait, c'est-à-dire quand une molécule n'a plus de proches voisines pour former un pont intermoléculaire (CHASSIN, 1975).

En résumé, les mécanismes de fixation des diols de faible poids moléculaire sont les mêmes que pour l'eau. Il en résulte que, suivant la nature du diol, on favorisera l'adsorption d'un composé aux dépens de l'autre.

2. 22. — *Cas des polyéthylèneglycols*

Avant de présenter les principaux résultats acquis sur l'adsorption des polyéthylèneglycols par la montmorillonite, il est bon de rappeler quelques définitions utilisées pour caractériser une macromolécule :

— segments : la macromolécule de polyéthylèneglycol, caractérisée par un degré de polymérisation N, est assimilée à un système mécanique formé de N segments rigides (CH_2—O—CH_2) reliés par N—1 rotules permettant des libres rotations autour des axes de liaison.

— Pour décrire la configuration du polymère à l'état adsorbé, trois types de séquences sont introduites (fig. 7) :

séquences dont tous les segments sont en contact avec la surface (« Trains ») ;

séquences en boucle (« Loops ») dont tous les segments, sauf les extrêmes, sont en dehors de la surface. Ces séquences en boucle réunissent les séquences adsorbées ;

séquences terminales (« Tails ») dont tous les segments, sauf le dernier, sont en dehors de la surface.

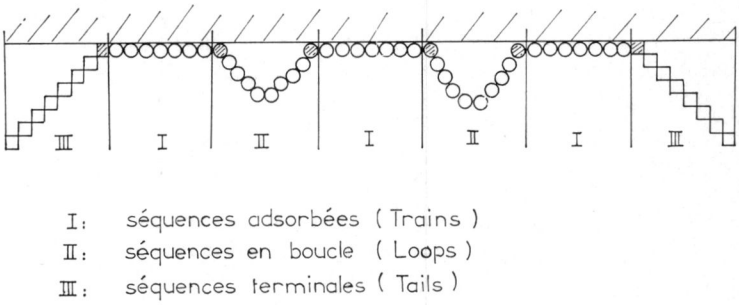


FIG. 7. — *Description schématique d'un macromolécule linéaire à l'état adsorbé*

L'adsorption de polyéthylèneglycols de taille variable par la montmorillonite, saturée par différents cations, a été étudiée par PARFITT et GREENLAND (1970). Il a été montré que :

— les quantités maximales fixées croissent avec le poids moléculaire ;

— la réversibilité des échanges décroît quand le poids moléculaire augmente, pour devenir impossible avec le polyéthylèneglycol 20 000 ;

— la macromolécule se fixe dans l'espace interfoliaire, sauf pour l'argile césique, essentiellement sous forme de séquences adsorbées.

Par ailleurs, l'établissement des isothermes d'adsorption à plusieurs températures, permet de calculer les constantes thermodynamiques de l'adsorption :

— Énergie libre $\Delta G = - RT \log Km$

— Enthalpie $\Delta H = - RT^2 \frac{d(\log Km)}{dT}$

— Entropie $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$

où Km : constante d'équilibre,
R : constante des gaz parfaits,
T : température absolue.

Deux faits importants ont été mis en évidence :

— L'énergie d'adsorption, calculée pour un segment, croît avec la taille des molécules et décroît quand le pouvoir polarisant du cation augmente. Les énergies ainsi calculées correspondent aux forces de VAN DER WAALS (300 à 500 cal./segment).

— L'enthalpie est d'autant plus élevée que le pouvoir polarisant du cation est grand et que la taille de la molécule est petite. Ainsi, avec la montmorillonite calcique, la variation d'enthalpie est nulle avec le polyéthylèneglycol 600 et de — 1 960 cal./segment avec le polyéthylèneglycol 200. D'une façon analogue, la variation d'enthalpie avec le polyéthylèneglycol 300 est nulle avec la montmorillonite césique et de — 2 100 cal./segment avec la montmorillonite Al^{3+}.

Ces résultats indiquent que les interactions cations-dipôles et les liaisons hydrogène ne sont pas les facteurs essentiels de l'adsorption. Ces auteurs ont montré qu'il y avait, en suspension, interaction entre les molécules d'eau de solvatation des cations et les fonctions éthers du polyéthylèneglycol.

Les fortes variations d'entropie accompagnant l'adsorption correspondent essentiellement à la désorption des molécules d'eau sur l'argile, la quantité déplacée étant d'autant plus importante que le poids moléculaire est grand ou que le pouvoir polarisant du cation est petit.

En résumé, les facteurs intervenant dans l'adsorption des polyéthylèneglycols par la montmorillonite sont :

— les interactions entre l'eau de solvatation des cations et les fonctions éthers du polyéthylèneglycol,

— les forces de dispersion entre les segments du polymère et la surface du silicate.

CHAPITRE III

ÉTUDE DES SYSTÈMES NON TRAITÉS

On a déjà signalé que la compréhension de l'hydratation de la montmorillonite calcique contenant des quantités variables d'un composé organique, nécessitait une étude préliminaire des associations stables qui apparaissent entre les composants du système ; ici entre la montmorillonite calcique, l'eau et un diol. Pour atteindre cet objectif, on a caractérisé les différents complexes (composition de la phase adsorbée, diagrammes de diffraction des RX, absorption infrarouge) obtenus en faisant varier la composition en eau et en diol de la solution d'équilibre.

Il est donc impératif que l'eau et le diol soient solubles en toutes proportions : c'est le cas des premiers termes de la série des diols aliphatiques (éthane 1,2 diol, propane 1,2 diol, propane 1,3 diol, butane 1,4 diol, butane 1,3 diol, butane 2,3 diol) ou des polyéthylèneglycols (di, tri, tétraéthylèneglycol).

Ces différentes déterminations et, en particulier, celle de la composition de la phase adsorbée, ne sont possibles que si l'argile ne contient pas de phase liquide en excès. Expérimentalement, on est donc conduit à étudier des équilibres phase solide-phase vapeur en équilibre avec les solutions eau-diol.

Cette deuxième remarque implique :

— que tous les diols utilisés soient caractérisés par des pressions de vapeurs saturantes voisines. En effet, les solutions eau-diol de faible poids moléculaire obéissant à une loi de RAOULT (cf. § 2.213), la composition de la phase gazeuse, pour une fraction molaire donnée, sera sensiblement constante si les pressions de vapeur saturante sont voisines ;

— que leurs pressions de vapeur saturante soient suffisantes pour obtenir des états d'équilibre dans un délai raisonnable, c'est-à-dire inférieur à six semaines.

Pour ces différentes raisons on s'est limité à :

— l'éthane 1,2 diol $CH_2OH—CH_2OH$
— le propane 1,2 diol $CH_2OH—CHOH—CH_3$
— le propane 1,3 diol $CH_2OH—CH_2—CH_2OH$
— le butane 1,4 diol $CH_2OH—CH_2—CH_2—CH_2OH$
— le butane 1,3 diol $CH_2OH—CH_2—CHOH—CH_3$
— le butane 2,3 diol $CH_3—CHOH—CHOH—CH_3$
— le diéthylèneglycol $CH_2OH—(CH_2—O—CH_2)_1—CH_2OH$
— le triéthylèneglycol $CH_2OH—(CH_2—O—CH_2)_2—CH_2OH$

3. 1. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3. 11. — *Présentation des résultats et définitions*

Pour caractériser les états d'équilibre, on a déterminé les espacements interréticulaires ool et les isothermes d'adsorption à partir desquels on a calculé les diagrammes de sélectivité :

— *Espacements interréticulaires :* lorsque l'espacement observé est égal à celui de l'argile immergée dans le diol, on parlera d'espacement « type diol ».

— *Isothermes d'adsorption :* pour assurer une représentation uniforme des résultats, on portera en abscisses la fraction molaire en eau des solutions, et en ordonnées les quantités adsorbées exprimées pour 100 g d'argile séchée à 300°C. L'ensemble des isothermes est présenté en annexe.

— *Diagramme de sélectivité :* on a représenté la variation de la fraction molaire du diol adsorbé en fonction de la fraction molaire du diol dans la solution. Ainsi, à une fraction molaire de x pour les isothermes d'adsorption correspondra une fraction molaire de $1-x$ pour les diagrammes de sélectivité.

— *Coefficient de sélectivité :* dans tout ce travail, on n'utilisera jamais les coefficients de sélectivité intégrés. Dire que l'argile est sélective pour le diol signifie qu'à une fraction molaire x_s de la solution, correspond une fraction molaire adsorbée x_a, telle que $x_a > x_s$.

— *Branche de type* A, *branche de type* P : selon les diols, les diagrammes de sélectivité présentent un nombre variable de branches quasi linéaires à forte pente ou à faible pente, appelées respectivement « branches de type A » ou « branches de type P ».

3. 12. — *Cas des diols contenant deux fonctions « alcool primaire »*

Parmi les diols étudiés, l'éthane 1,2 diol, le propane 1,3 diol, le butane 1,4 diol, le di et le triéthylèneglycol appartiennent à cette classe.

3. 121. *Cas de l'éthane 1,2 diol, du propane 1,3 diol et du butane 1,4 diol.*

Avec ces trois produits, et pour une même fraction molaire de la solution, les quantités d'eau fixées par la montmorillonite calcique augmentent quand le poids moléculaire du diol augmente (fig. 8).

Parallèlement, les quantités de diol fixées décroissent quand on passe de l'éthane 1,2 diol au butane 1,4 diol.

On remarque également que les quantités d'eau retenues par l'argile sont toujours inférieures à celles qu'elle fixe pour des humidités relatives équivalentes, mais en l'absence de matière organique (courbe 5, fig. 8) ; la différence entre ces deux valeurs étant d'autant plus importante que le poids moléculaire du diol est petit.

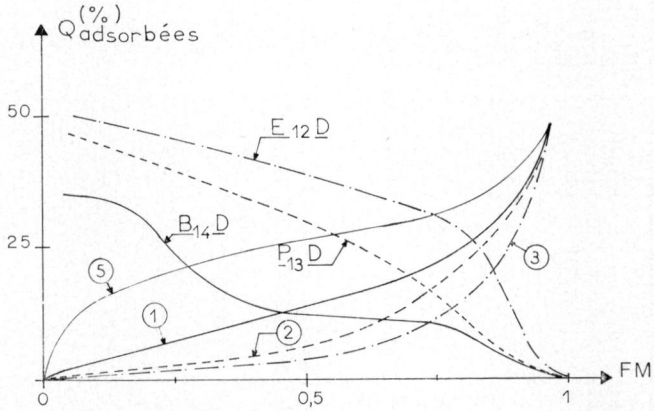


FIG. 8. — *Isothermes d'adsorption de la montmorillonite calcique en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-éthane 1-2 diol* (courbes E_{12} D et 3), *eau-propane 1-3 diol* (courbes P_{13} D et 2) *et eau-butane 1-4 diol* (courbes B_{14} D et 1). *L'isotherme 5 représente l'adsorption d'eau par la montmorillonite calcique en absence de diol.*

Cette différence de comportement de l'argile apparaît nettement sur les diagrammes de sélectivité (fig. 9) où on observe une adsorption préférentielle, soit pour le diol (cas de l'éthane 1,2 diol ; courbe 1, fig. 9), soit pour l'eau (cas du butane 1,4 diol ; courbe 3, fig. 9).

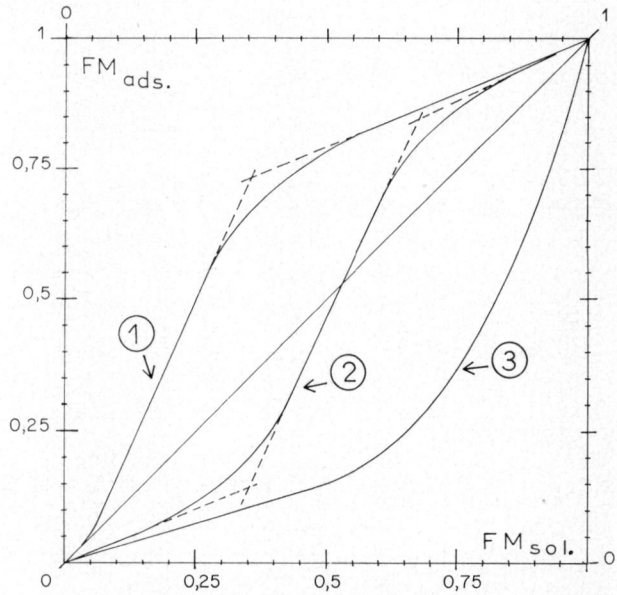


FIG. 9. — *Diagrammes de sélectivité de la montmorillonite calcique en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-éthane 1-2 diol* (courbe 1), *eau-propane 1-3 diol* (courbe 2) *et eau-butane 1-4 diol* (courbe 3)

TABLEAU 4

Distances interréticulaires de la montmorillonite calcique en équilibre avec la phase vapeur délivrée par différentes solutions eau-diols

Composition de la solution		CH_2OH CH_2OH	CH_2OH CH_2 CH_2OH	CH_2OH CH_2 CH_2 CH_2OH	CH_2OH $CH_2—O—CH_2$ CH_2OH	$CH_2—OH$ $(CH_2—O—CH_2)_2$ CH_2OH	CH_2OH $CHOH$ CH_3	$CH_2—OH$ CH_2 $CHOH$ CH_3	CH_3 $CHOH$ $CHOH$ CH_3
$x^{eau}{}_s$	$x^{diol}{}_s$								
0	1	$R^6{}_{16,9}$	$R^6{}_{18,4}$	$R^4{}_{15,4}$	$R^5{}_{16}$	$R^5{}_{17,3}$	$R^6{}_{18}$	$R^5{}_{14,8}$	$R^5{}_{14,8}$
0,05	0,95	$R^6{}_{16,9}$		$I_{15,4}$					$R^5{}_{14,8}$
0,1	0,9	$R^6{}_{16,9}$	$R^6{}_{18,4}$	$I_{15,3}$	$R^5{}_{16,}$	$R^5{}_{17,3}$	$R^6{}_{18}$	$R^5{}_{14,8}$	$R^7{}_{14,8}$
0,15	0,85	$R^6{}_{16,9}$					$R^9{}_{18}$		$R^7{}_{14,8}$
0,20	0,80		$R^6{}_{18,4}$	$I_{15,4}$	$R^5{}_{16,}$	$R^5{}_{17,3}$	$R^9{}_{18}$	$R^7{}_{14,8}$	
0,25	0,75	$R^6{}_{16,9}$	$R^6{}_{18,4}$	$I_{15,2}$				$R^7{}_{14,8}$	$R^7{}_{14,8}$
0,30	0,70				$R^5{}_{16}$		$R^9{}_{18}$		
0,35	0,65	$R^6{}_{16,9}$	$R^6{}_{18,4}$	$I_{15,4}$				$R^7{}_{14,8}$	$R^7{}_{14,8}$
0,40	0,60				$R^5{}_{16}$	$I_{17,2}$	$R^9{}_{18}$		$R^5{}_{14,8}$
0,45	0,55		$R^6{}_{18,4}$				$R^9{}_{18}$	$R^7{}_{14,8}$	
0,50	0,5	$R^6{}_{16,9}$	$R^6{}_{18,4}$	$I_{15,5}$	$R^5{}_{16}$	I_{16}		$R^5{}_{14,8}$	$R^5{}_{14,8}$
0,55	0,45		$I_{18,4}$					$R^5{}_{14,8}$	
0,60	0,4	$R^6{}_{16,9}$	I_{18}	$R^4{}_{15,6}$	I_{16}	$I_{15,8}$	$R^6{}_{18}$		$R^5{}_{14,8}$
0,65	0,35		$I_{17,3}$					$I_{14,8}$	$I_{14,8}$
0,70	0,30	$R^6{}_{16,9}$			I_{16}	$I_{15,7}$	I_{18}	$I_{14,8}$	$I_{15,7}$
0,75	0,25	I_{17}	$I_{15,5}$	$R^5{}_{15,7}$	I^{16}				$R^4{}_{15,8}$
0,80	0,20	I_{17}	$I_{15,5}$			$I_{15,7}$		$I_{14,8}$	$I_{15,8}$
0,85	0,15	$I_{17,1}$		$I_{15,8}$	$I_{15,8}$		$I_{17,8}$	$I_{15,7}$	$I_{16,1}$
0,90	0,10	$I_{17,4}$	$I_{16,5}$	$I_{16,5}$	$I_{16,5}$	$I_{16,4}$	$I_{16,5}$	$I_{15,9}$	
0,95	0,05	$I_{17,5}$	$I_{17,2}$	$I_{17,5}$	$I_{17,5}$	$I_{17,5}$	$I_{17,2}$	$I_{17,2}$	$I_{17,2}$
0,975	0,025	I_{18}		I_{18}	I_{18}	I_{18}			
1	0	I_{19}	I_{19}	I_{19}	I_{19}	I_{19}	I_{19}	I_{19}	I_{19}

Dans le tableau 4, on a reporté les espacements interréticulaires 001 observés aux rayons X, en précisant les caractéristiques des diagrammes (nombre d'ordres, diagrammes rationnels ou irrationnels). Lorsque les diagrammes sont rationnels, on a indiqué l'espacement moyen calculé sur les ordres observés ($R^6_{16,9}$ rationnel sur les 6 ordres observés, l'espacement moyen étant de 16,9 Å) ; par contre, on n'a mentionné que l'espacement apparent 001 si le diagramme est irrationnel (I_{17} : diagramme irrationnel avec un espacement apparent de 17 Å mesuré sur le premier ordre de diffraction).

L'examen simultané de ce tableau et du diagramme de sélectivité du propane 1,3 diol montre l'existence de trois domaines :

— lorsque la fraction molaire en diol de la solution d'équilibre est inférieure à 0,25, les distances interréticulaires sont caractéristiques d'une solvatation par l'eau et le diagramme de sélectivité présente une branche de type P, c'est-à-dire à faible pente ;

— inversement, lorsque la fraction molaire en diol est supérieure à 0,65, l'espacement est du type diol avec, là encore, présence d'une branche de type P sur le diagramme de sélectivité ;

— entre ces deux branches apparaît sur le diagramme, une branche de type A, c'est-à-dire à forte pente. Parallèlement, on observe l'apparition de systèmes interstratifiés traduisant le passage progressif d'un espacement type eau à un espacement type diol.

Avec l'éthane 1,2 diol, l'argile présente très rapidement une branche de type A et des espacements de type diol. A l'inverse, avec le butane 1,4 diol, la branche de type A apparaît pour des fractions molaires élevées et l'espacement de type diol ne s'observe que sur l'argile en équilibre avec des vapeurs exemptes d'eau.

Le comportement de l'argile vis-à-vis de ces deux produits peut donc être considéré comme un cas particulier de celui observé avec le propane 1,3 diol. Ainsi les diagrammes de sélectivité de l'argile pour le butane 1,4 diol ou l'éthane 1,2 diol s'obtiennent en supprimant respectivement la branche terminale ou initiale de type P observées avec le propane 1,3 diol.

Les spectres de vibration de déformation angulaire de l'eau adsorbée sur des complexes montmorillonite calcique éthane 1,2 diol appartenant, soit à la branche de type P ($x_s = 0{,}95$ et 0,85), soit à la branche de type A ($x_s = 0{,}3$ et 0,22) sont présentés sur la figure 10. Deux remarques peuvent être faites :

— l'absorption infrarouge est composée d'une bande pour les complexes appartenant à la branche de type P ;

— l'absorption infrarouge est composée de deux bandes pour les complexes appartenant à la branche de type A.

3. 122. *Cas du diéthylèneglycol et du triéthylèneglycol.*

On a reporté sur les figures 11 et 12 les diagrammes de sélectivité de l'argile calcique pour le di et le triéthylèneglycol. Les distances interréticulaires sont répertoriées dans le tableau 4.

L'observation de tous ces résultats montre que le diéthylèneglycol et le triéthylèneglycol se comportent respectivement comme le propane 1,3 diol et le butane 1,4 diol.

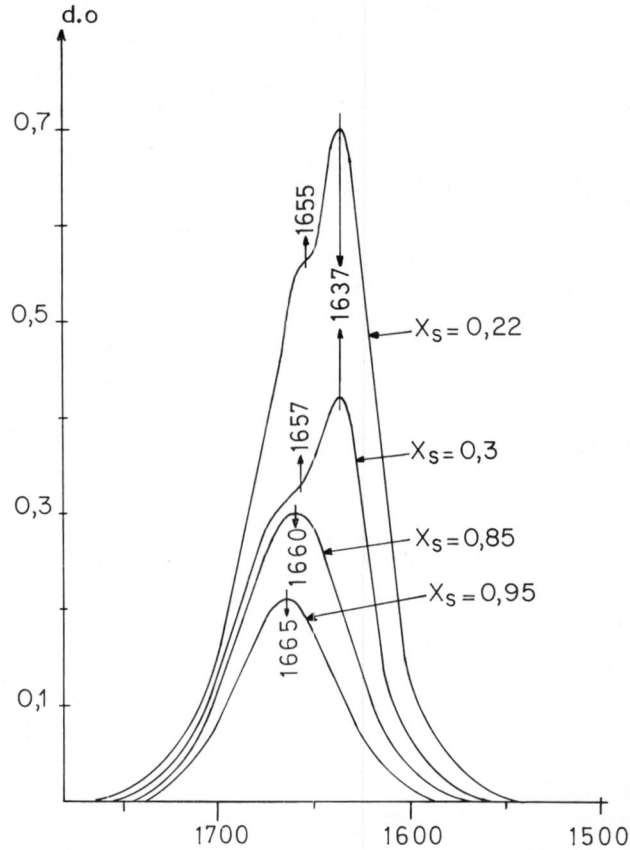


FIG. 10. — *Spectres de vibration de déformation angulaire de l'eau adsorbée sur les complexes montmorillonite-éthane 1-2 diol*

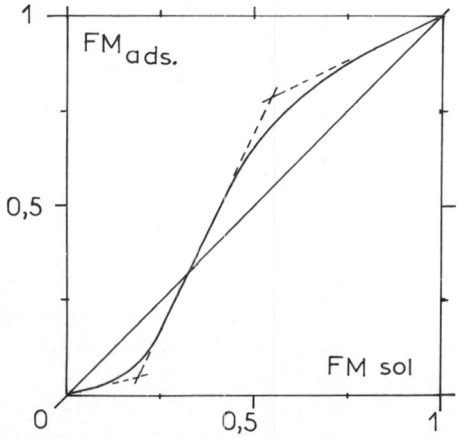


FIG. 11. — *Diagramme de sélectivité de la montmorillonite calcique en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-diéthylèneglycol*

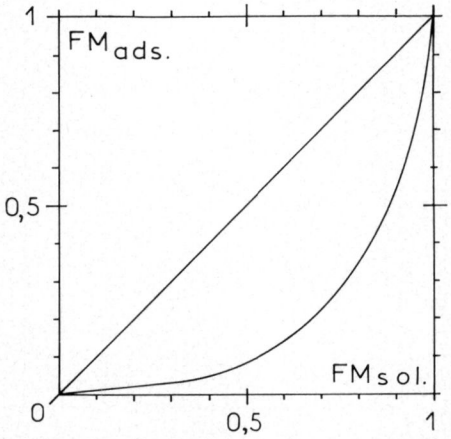


FIG. 12. — *Diagramme de sélectivité de la montmorillonite calcique en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-triéthylèneglycol*

3. 123. *Présentation synthétique des résultats.*

Pour les diols caractérisés par deux fonctions « alcool primaire », une branche de type P correspond toujours à une solvatation de l'argile par l'eau ou le diol. Parallèlement, une branche de type A s'accompagne d'une interstratification traduisant le passage d'un type de solvatation à l'autre.

On voit déjà qu'à chaque type de branche correspond un processus particulier de l'adsorption. Par exemple, une branche de type A indique un changement de solvatation de l'espace interfoliaire, car la diffraction des rayons X montre que l'on passe d'un espacement de type eau à un espacement de type diol, quand la fraction molaire en diol de la solution d'équilibre augmente.

Ainsi, les diagrammes de sélectivité représente bien les propriétés d'adsorption de la montmorillonite vis-à-vis de l'eau et d'un diol. Ils présentent normalement deux branches de type P séparées par une branche de type A (propane 1,3 diol, diéthylèneglycol). Cette figure idéale s'altère, pour les autres produits étudiés, par disparition d'une branche P (éthane 1,2 diol, butane 1,4 diol, triéthylèneglycol).

3. 13. — *Cas des diols contenant une fonction alcool primaire et une fonction alcool secondaire*

Parmi les produits étudiés, le propane 1,2 diol et le butane 1,3 diol appartiennent à cette catégorie.

3. 131. *Cas du propane 1,2 diol.*

Le diagramme de sélectivité et les distances interréticulaires sont reportés sur la figure 13 et dans le tableau 4.

On remarque immédiatement que les diagrammes de sélectivité de la montmorillonite pour le propane 1,2 diol et le propane 1,3 diol sont très différents. Alors que les diagrammes présentent une évolution analogue pour les faibles fractions molaires, on observe, pour le propane 1,2 diol, l'apparition d'une branche P, avec inversion des propriétés de sélectivité, pour des fractions molaires comprises entre 0,4 et 0,85 environ.

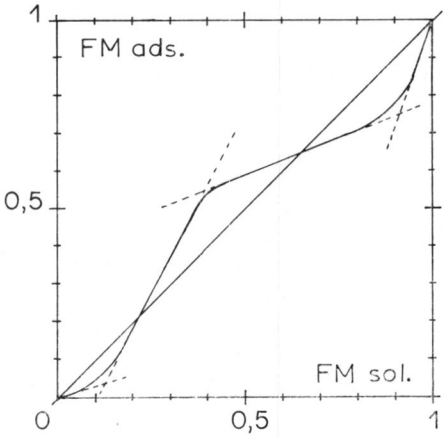


FIG. 13. — *Diagramme de sélectivité de la montmorillonite calcique en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-propane 1-2 diol*

La diffraction des rayons X montre que la solvatation de l'espace interfoliaire est assuré par l'eau tant que la fraction molaire de la solution est inférieure à 0,15, et par le propane 1,2 diol pour des fractions molaires supérieures ou égales à 0,4. Toutefois, on doit signaler que sur la branche de type P, comprise entre 0,4 et 0,85, les intensités diffractées sont supérieures à celles observées sur le complexe anhydre montmorillonite-propane 1,2 diol. On note également que la largeur à mi-hauteur des raies de diffraction est plus faible, et que le nombre d'ordres observés augmente : neuf au lieu de six.

Dans le tableau 5, on a reporté les caractéristiques des diagrammes observés avec le complexe montmorillonite-propane 1,2 diol et avec les complexes appartenant à la branche de type P intermédiaire.

TABLEAU 5

Comparaison des diagrammes de diffraction obtenus sur le complexe montmorillonite propane 1,2 diol anhydre ou en présence d'eau

Caractéristiques des diagrammes	Complexe montmorillonite $P_{12}D$	Complexe montmorillonite $P_{12}D$-H_2O
Nbre de raies observées	6	9
Largeur à mi-hauteur (en mm)		
001	22	17
002	23	17
003	27	19
004	21	18
005	22	20
Rapport des intensités		
001/005	260	364
002/005	184	319
003/005	61	113
004/005	84,5	123

En résumé, le comportement de la montmorillonite calcique en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions propane 1,2 diol-eau, peut se résumer ainsi :

— espacement interfoliaire de type eau et branche de type P pour des fractions molaires inférieures à 0,15 ;

— apparition de complexes d'interstratification et existence d'une branche de type A pour des fractions molaires comprises entre 0,15 et 0,4 ;

— existence d'une branche de type P et espacements de type diol avec renforcement des intensités et modification des diagrammes de diffraction pour des fractions molaires comprises entre 0,4 et 0,85 ;

— espacement interfoliaire de type diol et branche de type A pour des fractions molaires comprises entre 0,85 et 1. Dans toute cette zone, on observe une diminution du nombre d'ordres observés bien que le diagramme reste toujours rationnel.

3. 132. *Cas du butane 1,3 diol.*

Le diagramme de sélectivité est représenté sur la figure 14 alors que les distances interréticulaires sont reportées dans le tableau 4.

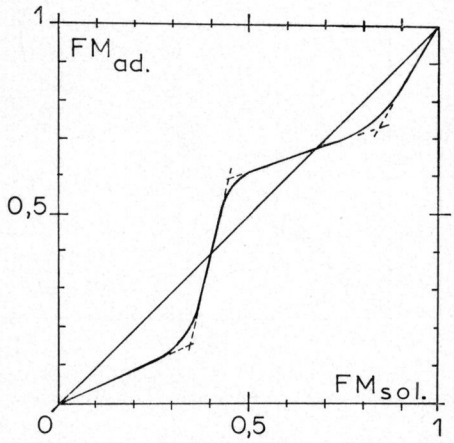


FIG. 14. — *Diagramme de sélectivité de la montmorillonite calcique en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-butane 1-3 diol*

Il y a une parfaite analogie entre le butane 1,3 diol et le propane 1,2 diol avec seulement changement des fractions molaires pour lesquelles apparaissent les différents domaines déjà mis en évidence. Les résultats peuvent donc se résumer ainsi :

— branche de type P et espacement interfoliaire de type eau, pour des fractions molaires inférieures à 0,35 ;

— branche de type A avec apparition de complexes d'interstratification, pour des fractions molaires comprises entre 0,35 et 0,45 ;

— branche de type P avec espacement de type diol et renforcement des intensités et modification des diagrammes de diffraction pour des fractions molaires comprises entre 0,45 et 0,85 ;

— branche de type A et espacement interfoliaire de type diol pour des fractions molaires comprises entre 0,85 et 1.

3. 133. *Résumé.*

Avec les diols contenant une fonction alcool primaire et une fonction alcoo secondaire, on note l'apparition d'une branche intermédiaire de type P sur les diagrammes de sélectivité. De plus, le renforcement des intensités diffractées dans ce domaine, indique que l'on est en présence d'un complexe bien structuré qui persiste malgré le changement apparent des propriétés de sélectivité de la montmorillonite.

En conclusion, le changement de structure du diol et, en particulier, la présence d'un groupement CH_3 terminal, entraîne une modification profonde des propriétés de la montmorillonite calcique.

3. 14. — *Cas des diols contenant deux fonctions alcool secondaire*

C'est le cas du butane 2,3 diol (CH_3—CHOH-CHOH—CH_3). Le diagramme de sélectivité, les distances interréticulaires, sont représentés sur la figure 15 et dans le tableau 4.

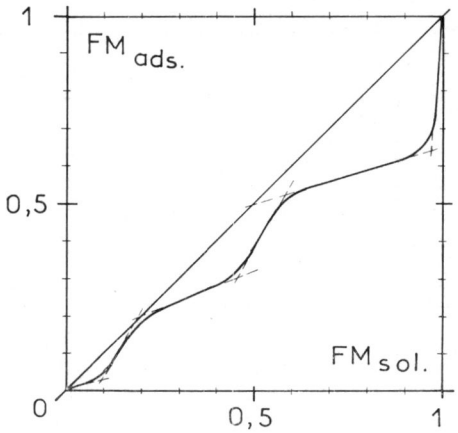


FIG. 15. — *Diagramme de sélectivité de la montmorillonite calcique en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-butane 2-3 diol*

C'est avec ce produit que l'on obtient le diagramme de sélectivité le plus complexe, comprenant trois branches de type A et trois branches de type P. Parallèlement, on observe que les isothermes d'adsorption présentent des accidents nets, à l'inverse des autres diols où l'évolution des quantités adsorbées est plus monotone.

La diffraction des rayons X montre que l'on passe graduellement d'un espacement d'un type eau à un espacement de type diol pour des fractions molaires comprises entre 0,1 et 0,2, fractions molaires pour lesquelles est définie la première branche de type A. L'expérience montre également un renforcement des intensités au niveau de la troisième branche de type P (0,6 < fractions molaires < 0,95).

3. 15. — *Conclusion*

Quelle que soit la nature du diol, on observe toujours une parfaite similitude entre l'évolution des espacements mesurés aux rayons X et celle des diagrammes de sélectivité calculés à partir des isothermes d'adsorption. Ainsi, un espacement caractéristique de l'un des composés (eau ou diol), correspond toujours à une branche

de type P sur les diagrammes de sélectivité. Inversement, le passage d'un type d'espacement à l'autre, avec apparition d'interstratifiés, correspondra toujours à une branche de type A sur les diagrammes de sélectivité.

Donc, pour expliquer le comportement de la montmorillonite en présence d'eau et de diol, on ne tiendra compte que des diagrammes de sélectivité, car ils contiennent toutes les informations.

3. 2. — INTERPRÉTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

3. 21. — *Signification des branches de type P et de type A sur les diagrammes de sélectivité de la montmorillonite*

Après avoir prouvé la coexistence de deux phases adsorbées sur l'argile ayant des caractéristiques différentes, on démontrera que les deux types de branches observées correspondent, soit à la stabilisation (branches de type P), soit à la modification (branche de type A) de la phase interfoliaire.

3. 211. *Existence de deux phases adsorbées.*

Pour argumenter notre démonstration, on prendra comme exemples un diol ne contenant que des fonctions alcool primaire (éthane 1,2 diol) et un diol contenant une fonction alcool primaire et une fonction alcool secondaire (propane 1,2 diol).

A la suite de nombreux travaux, il est admis que la quantité d'éthane 1,2 diol nécessaire au recouvrement monomoléculaire des surfaces de la montmorillonite est au minimum de 250 mg/g, et au maximum de 350 mg/g. De plus, le complexe est caractérisé par une distance interréticulaire voisine de 17 Å selon la nature du cation compensateur (16,9 Å avec le calcium).

L'examen des isothermes d'adsorption montre que des quantités d'éthane 1,2 diol, fixées par la montmorillonite calcique, peuvent dépasser 500 mg/g d'argile, alors que la distance interréticulaire observée est de 16,9 Å. Il y a donc de l'éthane 1,2 diol fixé en dehors des espaces interfoliaires.

Par la suite, on appellera *phase interfoliaire*, la phase directement en contact avec la surface et *phase interagrégat*, la phase en dehors des surfaces, cette dernière étant localisée dans le volume poral ménagé par les particules élémentaires.

Pour les complexes montmorillonite calcique propane 1,2 diol, on ne dispose pas de résultats aussi précis que pour l'éthane 1,2 diol. En mesurant les cinétiques de désorption du propane 1,2 diol, on a déterminé, sur quinze échantillons, la quantité de produit organique nécessaire pour assurer le recouvrement des surfaces. Cette méthode, qui a été utilisée par de nombreux auteurs avec l'éthane 1,2 diol, conduit à une quantité moyenne de 260 mg $\pm$ 5 mg/g et à une distance interréticulaire de 18 Å. Là encore, les quantités de propane 1,2 diol sont supérieures à cette valeur, bien que la distance interréticulaire soit de 18 Å.

On est donc conduit à définir l'existence d'une phase interfoliaire et d'une phase interagrégat adsorbées sur l'argile.

3. 212. *Conséquences de la présence de deux phases adsorbées.*

Soient x_i, x_e et x_s les fractions molaires de la phase interfoliaire, de la phase interagrégat et de la solution d'équilibre. Deux cas peuvent exister :

— $\forall\, x_s \in [0,1]\ \ x_e = x_i$. Ici, la distinction entre les deux phases adsorbées n'offre aucun intérêt, puisqu'on aura toujours $x_e = x_i = x_a$ (avec x_a : fraction molaire calculée à partir du dosage) ;

— $\forall\, x_s \in [0,1]\ x_e \neq x_i$. La méthode utilisée pour déterminer les quantités d'eau et de diol, ne distingue pas l'appartenance de ces produits à l'une ou l'autre phase. La fraction molaire de la phase adsorbée calculée et portée sur les diagrammes de sélectivité, représente donc la composition d'une solution fictive uniformément répartie dans l'espace interfoliaire et dans le volume poral, et dont la composition traduit la somme des contenus adsorbés en eau et en diol dans les deux phases.

Prenons, à titre d'exemple, une phase adsorbée contenant 90 p. 100 d'éthane 1,2 diol et 10 p. 100 d'eau. La fraction molaire calculée x_a et portée sur le diagramme de sélectivité sera donc de :

$$\frac{90/62}{90/62 + 10/18} = 0{,}72$$

Ce résultat peut être obtenu si $x_i = x_e = 0{,}72$ ou pour une infinité de valeurs x_e et x_i puisqu'il suffit que

$$\begin{cases} a + b = 90 \\ c + d = 10 \end{cases} \qquad \begin{cases} a + c = Q_i \\ b + d = Q_e \end{cases}$$

où

a et b représentent les quantités de diol interfoliaire et interagrégat ;
c et d représentent les quantités d'eau interfoliaire et interagrégat ;
Q_e et Q_i représentent les masses totales de sorbat interagrégat et interfoliaire.

Il en résulte que l'on doit chercher deux autres relations entre a, b, c et d pour qu'ils soient déterminés de façon univoque.

3. 213. *Composition de la phase interagrégat et signification des branches de type P.*

a) *Cas particulier de l'éthane 1,2 diol.*

Dans ce cas précis, les résultats fournis par la spectroscopie infrarouge permettent de définir les caractéristiques de la phase interfoliaire des complexes appartenant à la branche de type P.

On a déjà signalé que les spectres de déformation angulaire de l'eau adsorbée sont composés, soit d'une seule bande d'absorption située vers 1 660 cm^{-1} pour les complexes appartenant à la branche de type P, soit de deux bandes d'absorption situées à 1 637 cm^{-1} et vers 1 660 cm^{-1} pour les complexes appartenant à la branche de type A. Dans le tableau 6, on a rassemblé les fréquences de vibration de l'eau adsorbée sur la montmorillonite, sur les complexes argile-éthane 1,2 diol et en solution avec l'éthane 1,2 diol.

On remarque immédiatement que les bandes d'absorption situées vers 1 660 cm^{-1} ont des fréquences voisines de celles observées sur les solutions eau-éthane 1,2 diol. De plus, les fréquences de déformation angulaire de l'eau adsorbée sur le montmorillonite calcique, ne varient que de quelques cm^{-1}, quand la teneur en eau passe de 0 à 20 p. 100, sans toutefois atteindre des fréquences de l'ordre de 1 660 cm^{-1}. Or, à ces états d'hydratation, l'eau est essentiellement localisée dans les espaces interfoliaires. On peut donc admettre que les complexes appartenant à la branche de type P ne contiennent pas d'eau interfoliaire.

TABLEAU 6

Tableau récapitulatif des fréquences de vibration de déformation angulaire de l'eau

Fraction molaire de la solution	Fréquence de vibration de déformation angulaire de l'eau	
	sur les complexes	en solution eau-éthane 1,2 diol
0,22 (A)	1 655 cm^{-1} 1 637 cm^{-1}	1 652 cm^{-1}
0,30 (A)	1 657 cm^{-1} 1 637 cm^{-1}	1 655 cm^{-1}
0,85 (P)	1 660 cm^{-1}	1 660 cm^{-1}
0,95 (P)	1 665 cm^{-1}	1 662-1 665 cm^{-1}

Il en résulte que l'éthane 1,2 diol assure le recouvrement des surfaces de la montmorillonite, c'est-à-dire que la phase interfoliaire a les caractéristiques suivantes :

$$\begin{cases} c = 0 \Rightarrow x_i = 1 \\ 25 < Q_i < 30 \qquad \text{avec } Q_i = a \end{cases}$$

Connaissant les quantités d'eau (y p. 100) et les quantités de diol (x p. 100) à l'équilibre, il est possible de calculer les caractéristiques de la phase interagrégat pour tous les complexes appartenant à la branche de type P. En effet,

$$a + b = x$$
$$d = y$$
$$x_e = \frac{(x - a)/62}{(x - a)/62 + y/18}$$
$$25 < a < 30$$

Le calcul, réalisé pour différentes valeurs de a, montre que la fraction molaire de la phase interagrégat est très voisine de celle de la solution d'équilibre. Ce résultat est en très bon accord avec les fréquences des bandes d'absorption situées vers 1 650-1 660 cm^{-1} qui indiquent la présence d'une phase adsorbée dont la composition est égale à celle de la solution d'équilibre.

b) *Cas général.*

Ainsi, l'apparition d'une branche de type P sur le diagramme de sélectivité de la montmorillonite en équilibre avec la phase vapeur délivrée par des solutions eau-éthane 1,2 diol, traduit la juxtaposition d'une phase interfoliaire de composition constante ($x_i = 1$) et d'une phase interagrégat dont la fraction molaire est égale à celle de la solution d'équilibre.

D'après ce qui précède, la fraction molaire adsorbée x_a, calculée à partir des dosages, sera égale à la fraction molaire de la phase interagrégat ou de la solution d'équilibre si, et seulement si, $x_i = x_e = x_s$. Il s'ensuit que les courbes de sélectivité couperont la première bissectrice quand $x_a = x_i = x_e = x_s$.

La détermination expérimentale de ces points particuliers permettra donc de connaître la fraction molaire de la phase interfoliaire des complexes appartenant à la branche de type P, afin de tester les hypothèses :

$$\begin{cases} x_i = \text{constante} \\ x_e = x_s \end{cases}$$

A titre d'exemple, la courbe de sélectivité obtenue avec le propane 1,2 diol, coupe la bissectrice pour $x_s = 0{,}655$. Dans ce cas, il est possible de retrouver la quantité d'eau et de diol adsorbées pour tous les complexes appartenant à la branche de type P définie pour x_s compris entre 0,4 et 0,85, si

$$\begin{cases} x_e = x_s \\ x_i = 0{,}655 \end{cases} \qquad \begin{cases} Q_e = 18{,}5 \text{ p. } 100 \\ Q_i = 29 \text{ p. } 100 \end{cases}$$

où Q_e et Q_i représentent les masses de phase interagrégat et interfoliaire.

Ce résultat est d'ailleurs confirmé par la diffraction des rayons X. En effet, les particularités présentées par tous les diagrammes de diffraction des complexes appartenant à ce domaine (nombre d'ordre, intensité et largeur à mi-hauteur), traduisent l'invariance de la phase interfoliaire. On comprend également l'inversion des propriétés de sélectivité de l'argile dans ce domaine. Pour $x_s < 0{,}655$, l'argile présente une sélectivité pour le diol, car la fraction molaire de la phase interfoliaire est plus élevée que celle de la solution. Par contre, pour $x_s > 0{,}655$, l'argile présentera une sélectivité pour l'eau, car la fraction molaire de la phase interfoliaire est inférieure à celle de la solution d'équilibre.

Dans le tableau 7, on a récapitulé les différentes caractéristiques des phases interfoliaire et interagrégat qui permettent de retrouver les quantités d'eau et de diol adsorbées sur les complexes appartenant aux différentes branches de type P observées sur les diagrammes de sélectivité.

TABLEAU 7

Caractéristiques des phases interfoliaire et interagrégat des complexes appartenant aux branches de type P

Éthane 1,2 diol $x_s \in [0{,}5 ; 1]$	$x_i = 1$ $x_e = x_s$	$25 < Q_i < 32$ % $15 < Q_e < 20$ %
Propane 1,2 diol $x_s \in [0{,}4 ; 0{,}85]$	$x_i = 0{,}655$ $x_e = x_s$	$Q_i = 29$ % $Q_e = 18{,}5$ %
Butane 1,3 diol $x_s \in [0{,}5 ; 0{,}7]$	$x_i = 0{,}655$ $x_e = x_s$	$Q_i = 21{,}2$ % $15 < Q_e < 16$ %
Butane 2,3 diol $x_s \in [0{,}55 ; 0{,}85]$	$x_i = 0{,}5$ $x_e = x_s$	$Q_i = 23{,}1$ % $Q_e = 11{,}9$ %
Butane 2,3 diol $x_s \in [0{,}25 ; 0{,}4]$	$x_i = 0{,}2$ $x_e = x_1$	$Q_i = 21{,}9$ % $18 < Q_e < 20$ %

On remarque donc que les branches de type P sont explicables par la présence d'une phase interfoliaire de composition constante et d'une phase interagrégat dont la composition est égale à celle de la solution d'équilibre. Cette interprétation est en accord avec les résultats obtenus, soit par spectroscopie infrarouge, soit par diffraction des rayons X. Dans ces régions, la faible variation de la fraction molaire adsorbée représente l'alignement de la composition de la phase externe sur celle de la solution d'équilibre.

En outre, plusieurs remarques peuvent être faites :

— avec l'éthane 1,2 diol, la phase interfoliaire est anhydre, bien que la montmorillonite soit en équilibre avec une phase vapeur contenant de l'eau. Les surfaces de la montmorillonite présentent donc une sélectivité totale pour l'éthane 1,2 diol, dès que l'argile est en équilibre avec la phase vapeur délivée par des solutions contenant moins de 22 p. 100 d'eau ;

— avec le propane 1,2 diol, la masse interfoliaire est de 29 p. 100. Or, à 29 g d'une solution aqueuse de fraction molaire de 0,655, correspond une quantité de 25,7 g de propane 1,2 diol. Si l'on se rappelle que la quantité de propane 1,2 diol trouvée par les cinétiques de désorption est de 25,8 g, ceci signifie que le contenu interfoliaire en diol est maximum ;

— avec les diols contenant au moins une fonction alcool secondaire, le nombre de molécules d'eau trouvé par la molécule de diol, est directement relié aux nombres de groupements CH_3 terminaux portés par le composé organique. Ainsi, avec un radical CH_3 terminal (propane 1,2 diol ou butane 1,3 diol), ce nombre est de 0,5 ($x_i = 0{,}66$) alors qu'il est de 1 avec deux groupements CH_3 terminaux ($x_i = 0{,}5$ avec le butane 2,3 diol).

3. 214. *Signification des branches de type A.*

Les branches de type A observées sur les diagrammes de sélectivité vont donc représenter :

— la variation de la composition interfoliaire puisque d'une part, elles réunissent des branches de type P caractérisées par l'invariance de la phase interfoliaire et, d'autre part, apparaissent des complexes d'interstratification traduisant un changement de solvation de l'espace interfoliaire ;

— l'alignement de la composition de la phase externe sur celle de la solution d'équilibre.

3. 215. *Conclusion du paragraphe 321.*

La signification des différentes branches observées sur les diagrammes de sélectivité étant connue, on doit chercher à déterminer quels sont les paramètres qui gouvernent l'existence des branches de type P qui correspondent à des complexes interfoliaires stables, c'est-à-dire, à des niveaux d'énergie minimum des systèmes eau-montmorillonite-diol.

Toutefois, cette recherche ne peut prendre toute sa valeur que si l'on connaît bien la structure des phases interfoliaires stabilisées et, en particulier, celles qui apparaissent avec les diols contenant une ou deux fonctions alcool secondaire.

3. 22. — *Caractérisation des complexes formés avec les diols contenant au moins une fonction alcool secondaire*

Dans cette partie, on étudiera plus particulièrement les caractéristiques spectrales de l'eau adsorbée sur les complexes appartenant aux branches de type P définies pour des fractions molaires en diol de la solution d'équilibre comprises entre :

— 0,4 et 0,85 pour le propane 1,2 diol,
— 0,5 et 0,7 pour le butane 1,3 diol,
— 0,55 et 0,85 pour le butane 2,3 diol,
— 0,25 et 0,40 pour le butane 2,3 diol.

3. 221. *Caractéristiques spectrales de l'eau adsorbée.*

Les différentes absorptions de l'eau adsorbée sur les complexes montmorillonite-propane 1,2 diol ; montmorillonite-butane 1,3 diol ; montmorillonite-butane 2,3 diol sont présentées sur les figures 16, 17 et 18.

L'examen de ces différents spectres montre que l'eau adsorbée présente des caractéristiques analogues, à savoir :

— vibrations de valence de D_2O : 2 bandes d'absorption situées vers 2 500 et 2 670 cm^{-1} ;

— vibrations de déformation angulaire de H_2O : 1 bande dissymétrique qu'il est possible de décomposer en deux bandes situées vers 1635 et 1655 cm^{-1} ;

— vibrations de déformation angulaire de HOD : 3 bandes d'absorption sont résolues alors que la bande de vibration équivalente de H_2O ne présente qu'un maximum apparent.

Dans le tableau 8, on a reporté les fréquences d'absorption liées aux différents modes de vibration de la molécule d'eau adsorbée.

TABLEAU 8

Fréquences de vibration de l'eau adsorbée sur les complexes montmorillonite-diols contenant au moins une fonction alcool secondaire

Types de vibration	Montmorillonite			
	$P_{12}D$ $x_s = 0,65$	$B_{13}D$ $x_s = 0,65$	$B_{23}D$ $x_s = 0,7$	$B_{23}D$ $x_s = 0,3$
Valence de D_2O	2 490 2 680	2 500 2 660	2 510 2 670	2 510 2 670
Déformation angulaire de H_2O	1 637 1 660	1 637 1 657	1 637 1 650	1 632 1 650
Déformation angulaire de HOD	1 462 1 435 1 407	1 457 1 440 1 412	1 445 1 438 1 405	1 475 1 435 1 417

3. 222. *Interprétation des spectres infrarouges.*

On a montré, dans le paragraphe précédent, que ces différents complexes étaient caractérisés par la présence d'une phase interfoliaire et d'une phase interagrégat contenant de l'eau. Il s'ensuit que l'absorption infrarouge sera la somme de l'eau interfoliaire et de l'eau interagrégat.

Pour estimer la contribution de cette dernière, on a réalisé les spectres infrarouges des différentes solutions eau-diol dont la composition est égale à celle utilisée pour obtenir les états d'équilibre.

On a reporté dans le tableau 9 les caractéristiques spectrales de l'eau contenue dans ces solutions. La figure 19 représente le spectre des solutions eau-propane 1,2 diol non deutérées et partiellement deutérées.

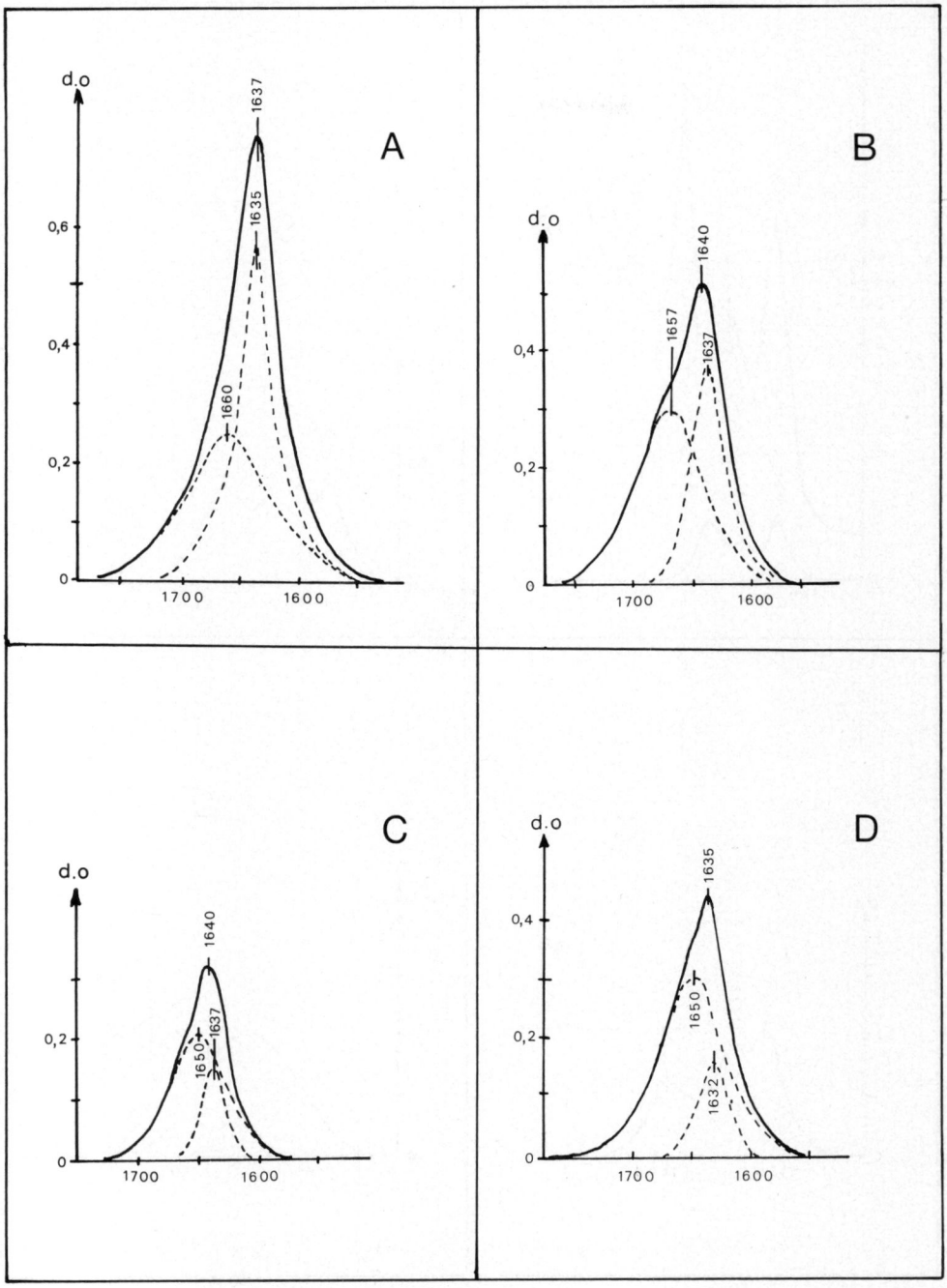


FIG. 16. — *Spectres de vibration de déformation angulaire de l'eau adsorbée sur les complexes montmorillonite propane 1-2 diol* (spectre A ; x_s = 0,65) *montmorillonite-butane 1-3 diol* (spectre B ; x_s = 0,65) *montmorillonite-butane 2-3 diol* (spectre C ; x_s = 0,7) ; *montmorillonite-butane 2-3 diol* (spectre D ; x_s = 0,35).

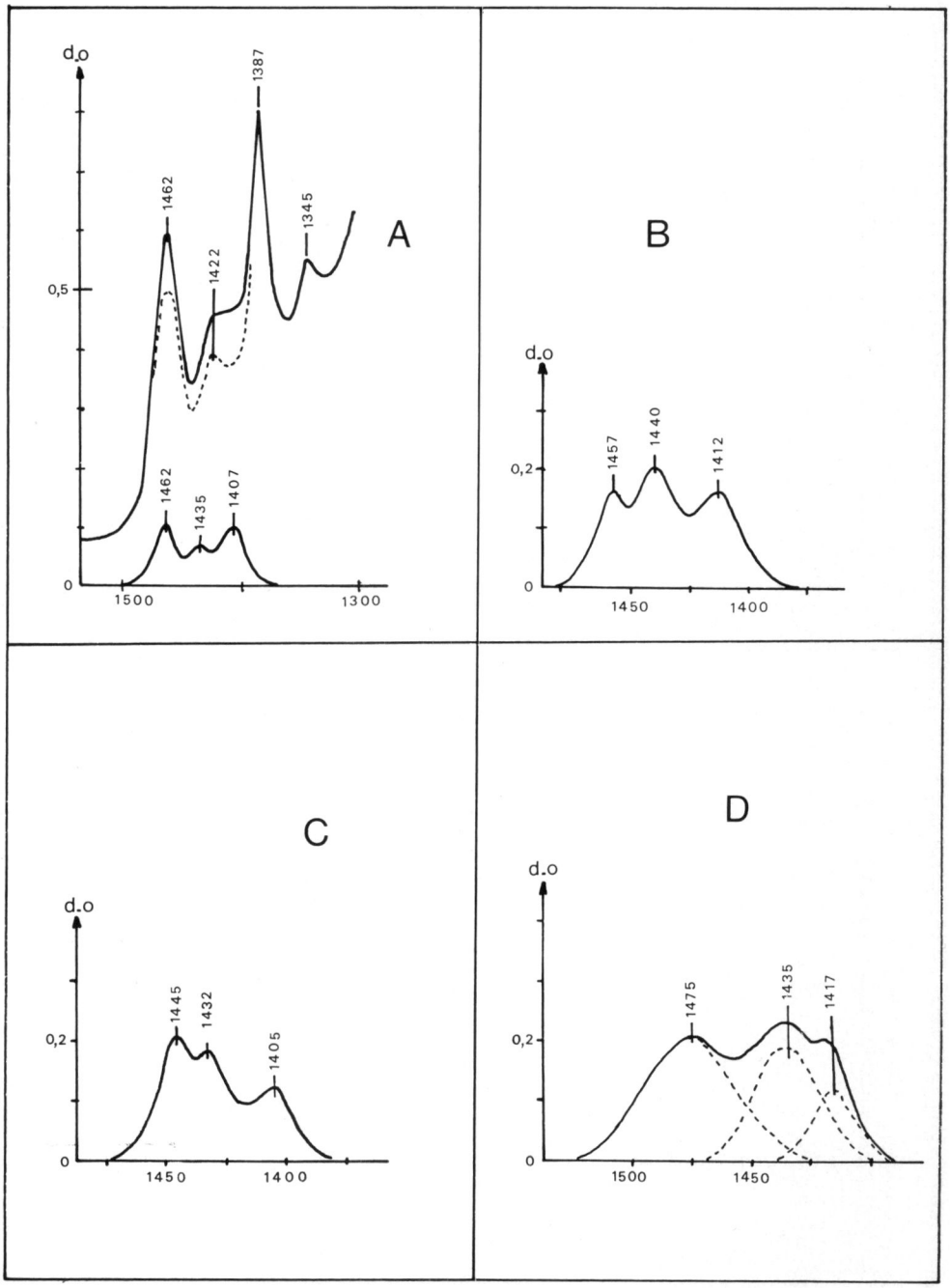


FIG. 17. — *Spectres de vibration de déformation angulaire de HOD*
(les spectres A, B, C, D, ont été obtenus pour des conditions précisées sur la fig. 15

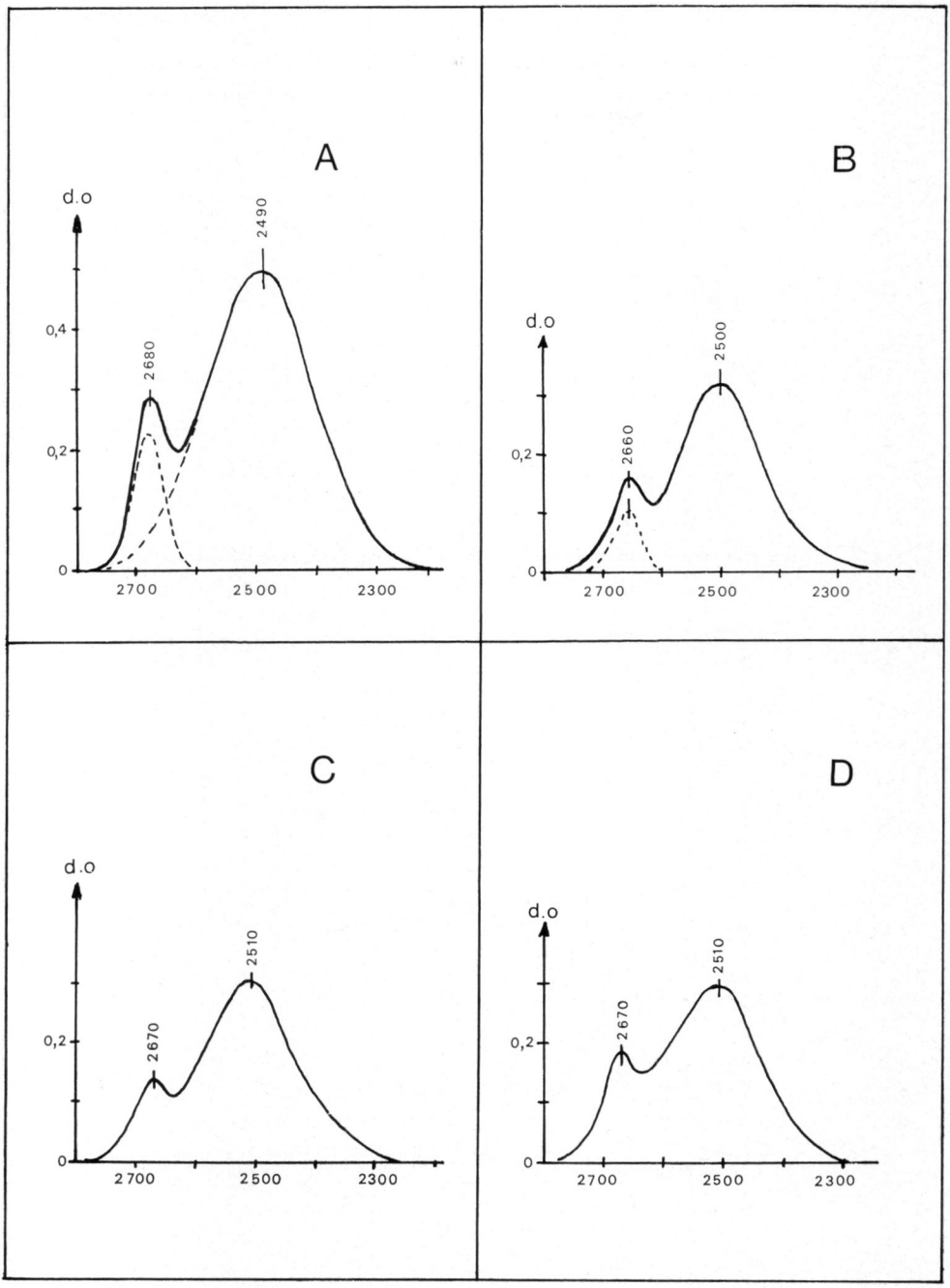


FIG. 18. — *Spectres de vibration de valence D_2O*
(les spectres A, B, C, D ont été obtenus pour des conditions précisées sur la fig. 15)

TABLEAU 9

Caractéristiques spectrales de l'eau contenue dans différentes solutions eau-diols

Solutions	Vibration de valence D_2O	Vibration de déformation angulaire	
		de H_2O	de HOD
Eau-$P_{12}D$ (x_s = 0,65)	2 500	1 660	1 462
Eau-$B_{13}D$ (x_s = 0,65)	2 500	1 660	1 455
Eau-$B_{23}D$ (x_s = 0,7)	2 500	1 650	1 475
Eau-$B_{23}D$ (x_s = 0,3)	2 500	1 652	1 450

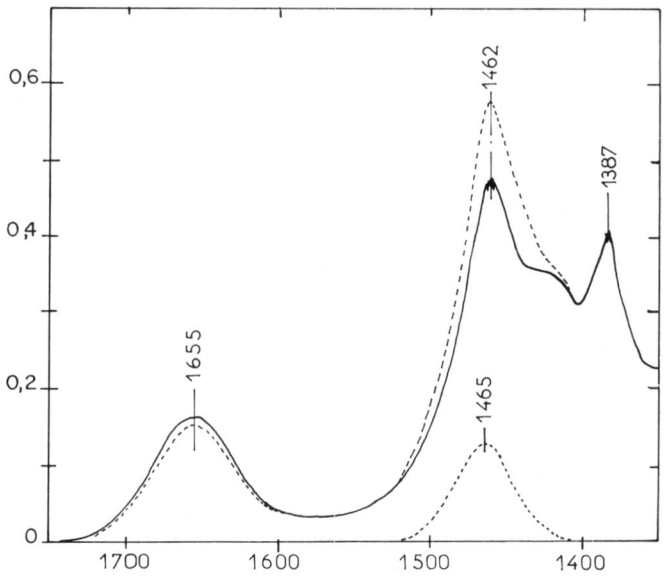


FIG. 19. — *Spectres de vibration de déformation angulaire de H_2O et HOD en solution dans le propane 1-2 diol* (x_s = 0,65)

Ainsi, sur les complexes, la solution interagrégat sera responsable des absorptions haute fréquence observées pour les mouvements de déformation angulaire de H_2O et HOD, alors que l'eau interfoliaire sera responsable des absorptions basse fréquence. Par exemple, avec le propane 1,2 diol, l'eau interagrégat est responsable

des absorptions à 1 660 (déformation angulaire de H_2O) et à 1 462 (déformation angulaire de HOD) alors que l'eau interfoliaire absorbe à 1 637, 1 435 et 1 407 cm^{-1}.

On remarque également qu'à une bande de déformation angulaire de H_2O correspondent deux bandes de déformation angulaire HOD. Ceci traduit l'existence d'une seule famille de molécules d'eau ayant contracté des liaisons hydrogène d'intensité inégales et de symétrie C_s (PROST, 1975 ; SEIDL *et al.*, 1969 ; BELLAMY et PACE, 1972).

Ces molécules sont alors responsables dans la région de vibration de valence de D_2O :

— d'une absorption haute fréquence correspondant à la vibration du deutéroxyle engagé dans la liaison hydrogène la plus faible ;

— d'une absorption basse fréquence correspondant à la vibration du deutéroxyle engagé dans la liaison hydrogène la plus intense. Cette absorption vient se superposer à celle produite par les molécules d'eau appartenant à la phase interagrégat.

Compte tenu de ces remarques, il est possible de faire les attributions des bandes d'absorption infrarouge de l'eau adsorbée sur les complexes appartenant aux branches de type P obtenues avec les diols contenant au moins une fonction alcool secondaire (tabl. 10).

TABLEAU 10

Caractéristiques et attributions des bandes d'absorption infrarouge de l'eau adsorbée sur les complexes montmorillonite-diols contenant au moins une fonction alcool secondaire

Types de vibration	Eau interagrégat			
	$P_{12}D$ $x_s = 0,65$	$B_{13}D$ $x_s = 0,65$	$B_{23}D$ $x_s = 0,7$	$B_{23}D$ $x_s = 0,3$
Valence de D_2O	2 500	2 500	2 500	2 500
Déformation angulaire de H_2O ..	1 660	1 657	1 650	1 650
Déformation angulaire de HOD .	1 462	1 445	1 445	1 475

Types de vibration	Eau interfoliaire			
	$P_{12}D$ $x_s = 0,65$	$B_{13}D$ $x_s = 0,65$	$B_{23}D$ $x_s = 0,7$	$B_{23}D$ $x_s = 0,3$
Valence de D_2O	2 500 2 680	2 500 2 660	2 500 2 670	2 500 2 670
Déformation angulaire de H_2O ..	1 637	1 637	1 637	1 632
Déformatiion angulaire de HOD .	1 435 1 407	1 440 1 412	1 432 1 405	1 435 1 417

3. 223. *Structure de la phase interfoliaire obtenue avec le propane 1,2 diol et le butane 1,3 diol.*

On a déjà montré que le contenu interfoliaire en produit organique était maximum et que le nombre moyen de molécules d'eau par molécule de diol était directement relié au nombre de groupements CH_3 terminaux.

Il paraît enfin intéressant de présenter le fait d'expérience suivant : la modification des diagrammes de diffraction observée sur les complexes appartenant à la branche de type P disparaît par une mise sous vide de l'échantillon puis réapparaît dès que l'argile contenant le diol est mise en contact avec les vapeurs délivrées par les solutions eau-diol correspondantes. La même expérience, réalisée en infrarouge, montre qu'une mise sous vide à la température du spectromètre entraîne la disparition de l'eau adsorbée.

De ces expériences, on déduit que l'eau interfoliaire n'est pas de l'eau de slovatation des cations car cette dernière n'est pas éliminée dans ces conditions (PROST, 1975 ; CALVET, 1972 ; MOONEY *et al.*, 1952). De plus, la présence d'une seule bande d'absorption haute fréquence sur les spectres de vibration de valence de D_2O, indique que toutes les molécules d'eau occupent des sites équivalents (PROST, 1975).

Tous ces résultats expérimentaux peuvent être expliqués si l'on admet que les liaisons hydrogène entre les molécules de diol sont assurées par l'eau, selon la figure 20 (BUC, 1963 ; KUHN, 1952, 1954 et 1958 ; KUHN et BOWMANN, 1961).

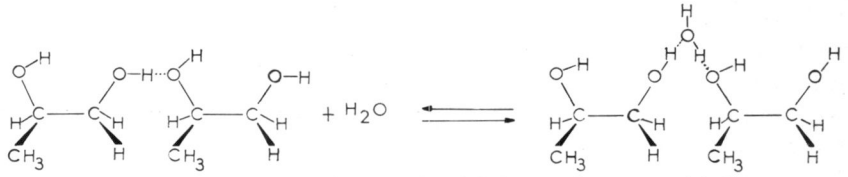


FIG. 20. — *Structure de la phase interfoliaire avec le propane 1-2 diol* ($x_s \in [0{,}4 ; 0{,}85]$) *et le butane 1-3 diol* ($x_s \in [0{,}5 ; 0{,}7]$)

3. 224. *Structure de la phase interfoliaire avec le butane 2,3 diol.*

Cas des complexes définis pour $x_s \in [0{,}55 ; 0{,}85]$.

Dans ce cas, le contenu interfoliaire en butane 2,3 diol est maximum et, là encore, on observe une modification des diagrammes de diffraction et une distance interréticulaire typique d'une solvatation des cations par le diol.

Les caractéristiques spectrales de l'eau adsorbée étant les mêmes qu'avec les diols contenant au moins une fonction alcool secondaire, on est amené à proposer un modèle équivalent mais où le nombre de molécules d'eau est doublé ($x_i = 0{,}5$ au lieu de 0,66) (fig. 21).

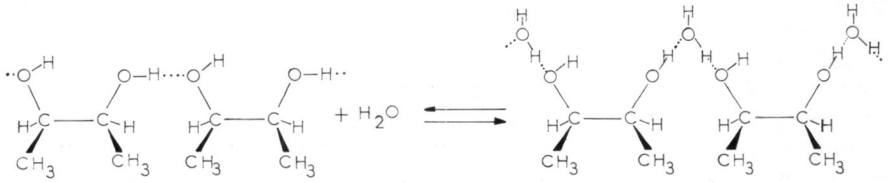


FIG. 21. — *Structure de la phase interfoliaire avec le butane 2-3 diol* ($x_s \in [0{,}55 ; 0{,}85]$)

Cas des complexes définis pour $x_s \in [0,25 ; 0,45]$.

Dans ce cas, le contenu interfoliaire en butane 2,3 diol n'est pas maximum, bien que l'espacement interfoliaire soit caractéristique d'une solvatation des cations par le diol.

Par ailleurs, on observe que l'eau adsorbée est facilement éliminable par mise sous vide. Il en résulte que ces molécules n'appartiennent pas à l'eau de solvatation des cations. Cette conclusion est confirmée par l'absence d'une bande d'adsorption infrarouge vers 2 600 cm^{-1}, caractéristique de l'eau appartenant à la première sphère d'hydratation des cations (PROST, 1975).

Ainsi, on doit admettre que, sur cette branche, le butane 2,3 diol assure la solvatation des cations alors que l'eau occupe tous les sites qui en sont éloignés. En d'autres termes, sur cette branche, l'eau de solvatation des cations a été remplacée par le diol, alors que l'eau de remplissage se maintient. Ces molécules, de symétrie C_s, sont responsables, sur les argiles dépourvues de matière organique, d'une double absorption dans la région de déformation angulaire de HOD distantes d'environ 20 cm^{-1} (PROST, 1975). Cette valeur est en très bon accord avec les 18 cm^{-1} observés sur le spectre HOD de l'eau adsorbée sur les complexes appartenant à ce domaine.

3. 23. — *Interprétation des diagrammes de sélectivité*

Dans cette partie, on utilisera les différents résultats acquis pour expliquer la forme des diagrammes de sélectivité de la montmorillonite calcique. Rappelons les deux conclusions principales auxquelles on est arrivé :

— les complexes sont formés d'une phase interfoliaire et d'une phase interagrégat dont la composition est égale à la solution d'équilibre ;

— les branches de type P représentent la stabilisation, dans l'espace interfoliaire, d'une phase de composition constante.

On va montrer que tous les diagrammes de sélectivité observés peuvent se déduire de celui du butane 2,3 diol en imposant des modalités particulières au remplissage de l'espace interfoliaire.

3. 231. *Interprétation du diagramme de sélectivité de la montmorillonite pour l'eau et le butane 2,3 diol.*

Le diagramme de sélectivité obtenu dans ce cas est reproduit sur la figure 22.

— branche n° 1 : solvatation de l'espace interfoliaire par l'eau (diffraction des rayons X) et fixation de butane 2,3 diol dans l'espace interagrégat ;

— branche n° 2 : solvatation progressive des cations par le butane 2,3 diol ;

— branche n° 3 : stabilisation d'une phase interfoliaire où le butane 2,3 diol assure la solvatation des cations et où l'eau occupe les sites éloignés des cations (rayons X, spectroscopie infrarouge) ;

— branche n° 4 : substitution de l'eau de remplissage par le butane 2,3 diol ;

— branche n° 5 : stabilisation d'une phase interfoliaire où le butane 2,3 diol assure le recouvrement des surfaces de l'argile mais où l'eau sert à l'établissement de liaisons hydrogène intermoléculaires ;

— branche n° 6 : élimination de l'eau interfoliaire assurant les liaisons hydrogène intermoléculaires car le contenu interfoliaire en butane 2,3 diol est maximum et que le complexe est anhydre pour $x_s = 1$.

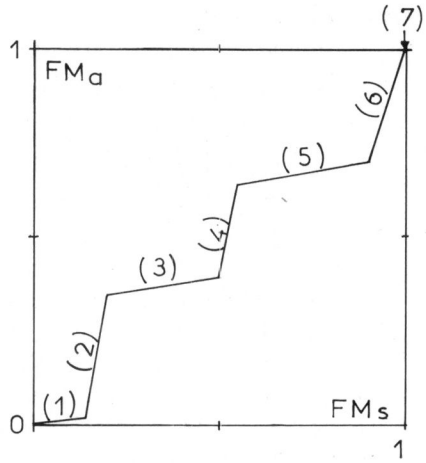


FIG. 22. — *Diagramme de sélectivité obtenu avec les diols contenant deux fonctions alcool secondaire*

Bien qu'on ne l'ait signalé que pour la branche n° 1, il est évident qu'à côté des variations de la composition de la phase interfoliaire, se juxtaposent celles de la phase interagrégat pour que :

$$\forall\ x_s \in [0,1] \text{ on ait la relation } x_e = x_s$$

3. 232. *Interprétation du diagramme de sélectivité de la montmorillonite pour l'eau et le propane 1,2 diol* (ou le butane 1,3 diol).

La forme générale des diagrammes de sélectivité obtenue avec ces produits est rappelée dans la figure 23.

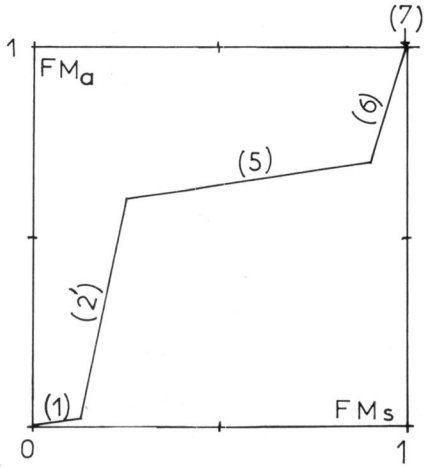


FIG. 23. — *Diagramme de sélectivité obtenu avec les diols contenant une fonction alcool primaire et une fonction alcool secondaire*

— branche n° 1 : solvatation de l'espace interfoliaire par l'eau (diffraction des rayons X) ;

— branche n° 2' : solvatation progressive de l'espace interfoliaire par le diol. Dans ce cas, il y a solvatation des cations et substitution de l'eau de remplissage par le diol puisqu'en fin de palier le contenu interfoliaire en produit organique est maximum ;

— branche n° 5 : stabilisation d'une phase interfoliaire où l'eau assure des ponts intermoléculaires entre les molécules de diol ;

— branche n° 6 : élimination de l'eau interfoliaire assurant les ponts hydrogène intermoléculaires.

On remarque que la simplification de ces diagrammes de sélectivité par rapport à celui observé avec le butane 2,3 diol, correspond à la succession des étapes 2 et 4 et, par conséquent, à la suppression de l'étape 3. Donc, les étapes 2, 3 et 4 sont incluses dans l'étape 2'

$$\{2'\} \supset \{2, 3, 4\}$$

3. 233. *Interprétation des diagrammes de sélectivité observés avec les diols ne contenant que des fonctions alcool primaire.*

C'est avec ces produits que l'on observe les diagrammes les plus simples. Après une branche de type P traduisant une solvatation de l'espace interfoliaire par l'eau, on observe un remplacement de l'eau par le diol pour aboutir à une phase interfoliaire ne contenant plus d'eau (cas du propane 1,3 diol par exemple). Dans ce cas, les étapes 2, 4 et 6 se succèdent pour donner naissance à une branche où la phase interfoliaire ne contient que du diol. Cette étape n'a pas été mise en évidence sur les diols contenant au moins une fonction alcool secondaire car, si elle existe, elle apparaîtra dans un domaine très réduit et pour lequel les erreurs de dosage que l'on peut commettre sont très importantes.

La filiation des différents diagrammes de sélectivité de la montmorillonite peut donc être représentée de la façon suivante (fig. 24) :

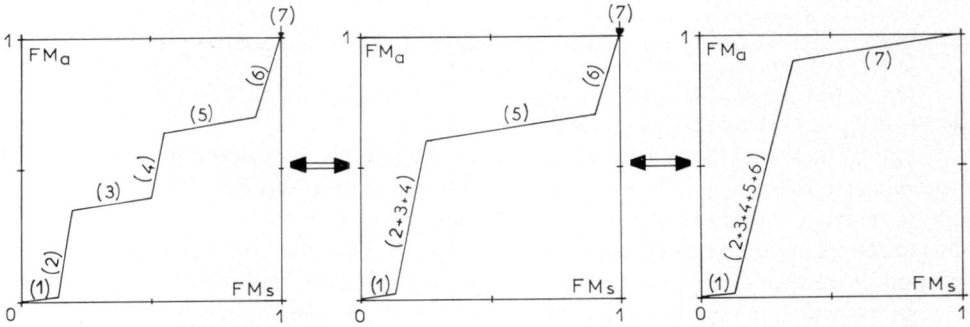


FIG. 24. — *Filiation des divers types de diagrammes de sélectivité observés avec les diols*

3. 234. *Conclusion.*

D'après ce qui précède, la forme particulière des diagrammes de sélectivité de la montmorillonite traduit les modalités du remplissage de l'espace interfoliaire. Pour terminer cette étude, il convient donc d'expliciter les paramètres qui gouvernent l'adsorption préférentielle de l'eau ou du diol par l'argile.

3. 24. — *Origine des propriétés de sélectivité de la montmorillonite*

Dans un travail consacré à l'étude théorique de l'hydratation de la montmorillonite, CALVET (1973) a mis en évidence que les interactions cations-dipôles et les liaisons hydrogène intermoléculaires fournissaient une contribution énergétique majeure dans le processus d'adsorption et, qu'en première approximation, le comportement des argiles gonflantes est relié à l'énergie d'hydratation des cations compensateurs de la charge.

Il nous est donc apparu logique de chercher l'origine des propriétés de sélectivité des surfaces dans ce type d'interactions en étudiant, plus particulièrement, leur évolution avec la nature du diol.

3. 241. *Étude des interactions cations-dipôles.*

On a reporté dans le tableau 11 le moment dipolaire μ de différents diols étudiés dans ce travail, en précisant la température à laquelle cette détermination a été effectuée.

TABLEAU 11

Moments dipolaires de divers diols mesurés dans le dioxanne

Diol	μ(D)	°C	Références
Éthane 1,2 diol	2,27	20	KETELAAR et VAN MEURS (1957)
Propane 1,2 diol	2,25	25	SMYTH et WALLS (1931)
Propane 1,3 diol	2,46	20	KETELAAR et VAN MEURS (1957)
Butane 1,3 diol	2,66	20	BUC (1963)
Butane 1,4 diol	2,47	20	KETELAAR et VAN MEURS (1957)
Diéthylèneglycol	2,69	25	UCHIDA *et al.* (1965)
Triéthylèneglycol.....	2,99	25	*id.*

On remarque que le moment dipolaire de tous ces diols est supérieur à celui de l'eau (1,83 D, EISENBERG et KAUZMANN, 1969).

En admettant le schéma simple selon lequel les propriétés de solvatation peuvent être décrites par le biais des interactions cations-dipoles, et en supposant que la distance cation-dipole est identique pour tous les systèmes étudiés, l'affinité de l'argile pour un composé sera d'autant plus grande que son moment dipolaire est plus élevé. Ainsi, avec l'eau et les diols, on devrait noter une affinité plus grande et, par voie de conséquence, une sélectivité de l'argile pour le composé organique.

Expérimentalement, on constate que ce schéma simple s'applique à l'éthane 1,2 diol car l'argile manifeste pratiquement toujours une sélectivité pour ce produit, sélectivité des surfaces d'ailleurs sous-estimée sur les diagrammes par suite d'une phase interagrégat.

Par contre, avec les autres diols, on observe une sélectivité globale de plus en plus marquée pour l'eau bien que leurs moments dipolaires augmentent légèrement (tabl. 10). Il semble donc qu'il y ait contradiction entre ces résultats et ce schéma simple, admis par de nombreux auteurs, pour expliquer l'hydratation des argiles.

Montrons que sur l'argile, on ne peut pas assimiler les molécules de diol à un dipole, mais que l'on doit tenir compte de leur structure.

3. 2411. *Description du moment dipolaire des diols en solution.*

Différents travaux consacrés au calcul théorique des moments dipolaires des diols en solution, montrent qu'ils ont essentiellement pour origine les liaisons CO et OH (KRISHNAMURTHY et SOUNDARARAJAN, 1969; BHAUMIK *et al.*, 1972; UCHIDA *et al.*, 1956). Ainsi, avec les polyéthylèneglycols de formule générale

$$HO—(CH_2—CH_2—O)_n—H$$

et représentés sur la figure 25, le moment dipolaire μ_n est égal à :

$$\mu_n = \mu'_0(\vec{e}_1 - \vec{e}_{3n+2}) - \mu_0 \sum_{i=1}^{n} (\vec{e}_{3i-1} - \vec{e}_{3i+1}) \qquad (1)$$

où μ_0 et μ'_0 représentent les moments dipolaires portés par les liaisons :

C—O : 1,20 D

O—H : 1,53 D

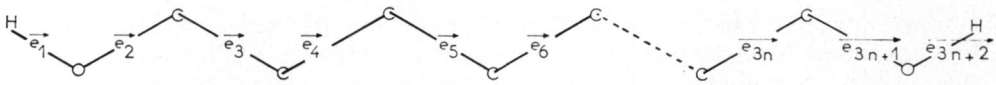


FIG. 25. — *Représentation simplifiée des polyéthylèneglycols*

En supposant que tous les angles de liaisons sont égaux et qu'il existe une libre rotation autour des axes de liaison, cette formule devient [1] :

$$< \mu^2 > = 2(\mu'_0)^2(1 - p^{3n+1}) - 4\,\mu'_0\mu_0 \frac{p(1-p^2)(1-p^{3n})}{1-p^3} + 2\,\mu_0^2 \frac{(1+p)(1-p)^2}{1-p^3}\left(n + \frac{p(1+p)(1-p^{3n})}{1-p^3}\right) \qquad (2)$$

où p représente le cosinus entre deux vecteurs unitaires portés par deux liaisons voisines ($p = -1/3$ si les liaisons sont tétraédriques).

La bonne concordance entre les valeurs calculées et observées indique que le modèle choisi décrit bien ce type de molécule, à savoir que seules les liaisons CO et OH sont dipolaires et que la différence d'énergie entre les formes *gauche* et *trans* est très faible. Il en résulte qu'il sera nécessaire de caractériser la molécule adsorbée par $2n + 2$ dipôles ($2n$ dipôles portés par les liaisons CO et 2 dipôles portés par les liaisons OH) pour calculer les interactions entre le cation compensateur et une telle molécule.

Dans un autre travail sur la distribution des charges et le moment dipolaire de plusieurs alcools aliphatiques, KRISHNAMURTHY et SOUNDARARAJAN (1969) ont montré que le moment dipolaire de l'éthane 1,2 diol, calculé pour la forme *gauche* ($\varphi = 64°$) est les OH *cis* et *trans* (fig. 26), est en très bon accord avec la valeur mesurée (2,27 D). Ce résultat corrobore d'ailleurs les données spectroscopiques.

[1] Le passage de la formule (1) à la formule (2) nécessite de nombreux calculs donnés dans la publication de UCHIDA *et al.* (1956).

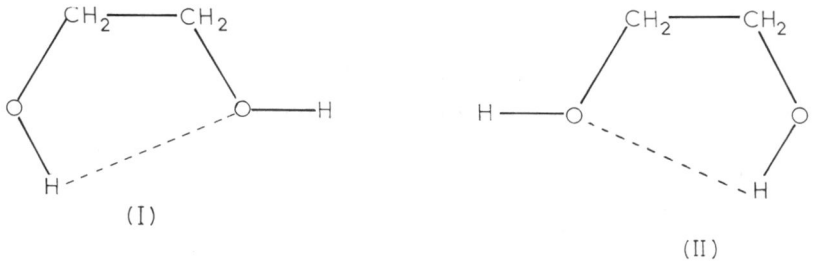


FIG. 26. — *Configurations stables de l'éthane 1-2 diol*

Ces exemples montrent que le moment dipolaire global de la molécule dépend étroitement de sa configuration : forme *gauche* pour l'éthane 1,2 diol ($\varphi = 64°$), formes *gauche* et *trans* équiprobables pour les polyéthylèneglycols.

3. 2412. *Courbes d'énergie potentielle des cations induites par les molécules de diol.*

Un tel calcul est, a priori, difficile car :

— La nature du support ne permet généralement pas, sauf cas particulier (CHASSIN, 1971), de déterminer la conformation du produit adsorbé, que ce soit par diffraction des rayons X (cristallinité imparfaite) ou par spectroscopie infrarouge (absorption du réseau silicaté rendant inaccessible certains domaines spectraux).

— Les cations interfoliaires et les atomes d'oxygène du réseau modifient le diagramme de répartition des charges de la molécule adsorbée (polarisation, effets inductifs).

— La description d'une molécule par un dipôle n'est qu'une approximation et la connaissance des moments quadripolaires et octopolaires est théoriquement nécessaire.

Toutefois, pour estimer les variations des courbes de potentiel pour les différents diols étudiés dans ce travail, on a fait des hypothèses simplificatrices sur la conformation moléculaire, sur les diagrammes de répartition des charges et sur la disposition relative du cation et de la molécule. Ainsi on a supposé que :

— le squelette de toutes les molécules est en configuration *trans*, seuls les OH pouvant être en position *cis* ou *trans* ;

— le propane 1,2 diol et le butane 2,3 diol sont des dérivés substitués de l'éthane 1,2 diol. De la même façon, on a supposé que le butane 1,3 diol dérive du propane 1,3 diol ;

— les paramètres moléculaires sont

$$r_{C-C} = 1{,}54 \text{ Å} \quad r_{C-O} = 1{,}43 \text{ Å} \quad r_{O-H} = 0{,}97 \text{ Å}$$

C—C—C— = C—C—O = C—O—C = C—O—H = angle tétraédrique

— seules les liaisons OH et CO sont dipolaires. Comme pour les polyéthylèneglycols, on a pris $\mu_{C-O} = 1{,}20$ D et $\mu_{O-H} = 1{,}53$ D. On a également supposé que la résultante était ponctuelle et localisée sur l'atome d'oxygène ;

— la distribution des charges n'est pas modifiée par le cation et le réseau de l'argile ;

— le cation et la molécule se meuvent sur deux axes parallèles situés dans le plan moléculaire et à distance constante a, un des axes passant toujours par les centres des atomes d'oxygène des fonctions alcool portées par la molécule.

Dans ce cadre d'hypothèses simplificatrices, on a déterminé les courbes de potentiel des cations induites par différents diols, en utilisant la formule :

$$V = \sum_i \frac{\mu_i \cos \alpha_i}{r_i^2}$$

où

μ_i : moment dipolaire associé à un atome d'oxygène appartenant, soit à une fonction alcool, soit à une fonction éther ;

α_i : angle entre la direction cation-oxygène et la résultante vectorielle des dipôles élémentaires liés aux liaisons CO et OH ;

i : nombre de groupements dipôlaires :

$$\left(i = \frac{\text{nombre de dipôles}}{2}\right) ;$$

r_i : distance entre le cation et le i^{eme} atome d'oxygène porteur du dipôle.

Pour les homologues supérieurs de l'éthane 1,2 diol (propane 1,3 diol, butane 1,4 diol, pentane 1,5 diol), on remarque que l'éloignement progressif des deux fonctions alcool primaire se manifeste par l'appariton de deux puits de potentiels de moins en moins profonds (fig. 27). De ce fait, existent deux positions stables pour l'ensemble cation-diol correspondant à l'interaction privilégiée entre le cation et un groupement dipolaire de la molécule.

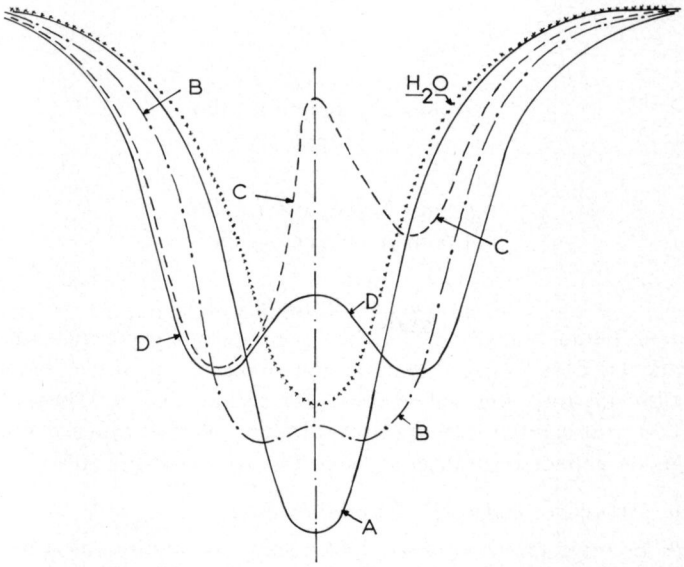


FIG. 27. — *Courbes de potentiel des cations induites par divers diols.*
Courbe A : éthane 1-2 diol (OH *cis*) ; *courbe B : propane 1-3 diol* (OH *trans*) ;
courbe : butane 1-4 diol (OH *cis* et *trans*) ; *courbe D : pentane 1-5 diol* (OH *trans*)

Dans ces calculs, on a supposé que les atomes d'hydrogène portés par les atomes de carbone ne font pas écran entre le cation et le groupement dipolaire. Cette hypothèse se traduit essentiellement par une moins bonne séparation des puits de potentiels sur la figure 27.

3. 2413. *Conséquences.*

Avec l'éthane 1,2 diol, l'énergie d'interaction entre le cation compensateur et la molécule sera directement proportionnelle au moment dipolaire total car la position la plus stable apparaît quand le cation et le moment dipolaire sont alignés. On notera donc un remplacement de l'eau de solvatation des cations par le diol car l'énergie d'interaction cation-éthane 1,2 diol sera supérieure à celle du type cation-eau.

Inversement avec le butane 1,4 diol, la position stable correspond à l'interaction du cation avec un seul groupement dipolaire de la molécule. Dans ce cas, le moment dipolaire réellement à proximité du cation sera plus faible que celui de l'eau et les interactions du type cation-eau seront privilégiées. On observera une solvatation préférentielle des cations par l'eau.

3. 2414. *Interprétation des distances interréticulaires.*

Dans le cadre de ce modèle simplifié, la solvatation des cations par le diol sera d'autant plus difficile que les groupements hydroxyles seront éloignés. De plus, l'espacement caractéristique du type diol doit apparaître pour des fractions molaires de la solution d'équilibre assez voisines pour les diols appartenant à une même famille (α, β ou γ diols) car la distance hydroxyle est la même.

Expérimentalement, la solvatation des cations par le diol mise en évidence par diffraction des rayons X, apparaît pour des fractions molaires en diol de la solution d'équilibre de :

α *diols :*
0,35 pour l'éthane 1,2 diol
0,4 pour le propane 1,2 diol
0,4 pour le butane 2,3 diol

β *diols :*
0,5 pour le propane 1,3 diol
0,5 pour le butane 1,3 diol

γ *diols :*
0,95 pour le butane 1,4 diol.

Il y a donc bonne concordance entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux. De plus, l'égalité des fractions molaires, pour une même famille de diol, auxquelles apparaît une solvatation des cations par le composé organique, montre que l'on peut comparer les résultats obtenus pour les différents diols bien que leurs pressions de vapeur saturante ne soient pas strictement égales.

3. 242. *Étude des liaisons hydrogène intermoléculaires.*

Dire que les interactions cations-dipôles sont dominantes ne signifie pas pour autant qu'elles soient les seules. Ainsi Calvet (1973) a montré que les liaisons hydrogène intermoléculaires apportaient une contribution énergétique non négligeable dans le cas de l'adsorption de l'eau par la montmorillonite ; celles-ci pouvant même devenir très rapidement dominantes avec des cations peu polarisants, Caesium par exemple.

Pour estimer l'énergie des liaisons hydrogène intermoléculaires que peuvent contracter les diols adsorbés sur l'argile, on a mesuré les fréquences de vibration des hydroxyles liés. Cette méthode d'évaluation représente bien l'énergie des liaisons

hydrogène car les fréquences propres de vibration des hydroxyles des diols est pratiquement indépendante de la taille de la molécule et de la nature de la fonction alcool (BUC, 1963 ; QUIVORON et NEEL, 1966 *a*, *b*).

Les fréquences observées dans la région de vibration de valence des OD peuvent se classer en trois groupes suivant la structure du diol considéré :

— diols ne contenant que des fonctions alcool primaire : $\nu \sim 2\,460$ cm^{-1} ;

— diols contenant 1 fonction alcool secondaire : $\nu \sim 2\,500$ cm^{-1},

— diols ne contenant que des fonctions alcool secondaire : $\nu \sim 2\,540$ cm^{-1}.

L'abaissement de fréquence dû à la liaison hydrogène est donc d'autant plus petit que le diol contient plus de fonctions alcool secondaire. Il s'ensuit que l'énergie des liaisons hydrogène, mesurée d'une façon globale, sera plus faible avec les diols contenant des fonctions alcool secondaire qu'avec les diols ne contenant que des fonctions alcool primaire.

La diminution de l'énergie de la liaison hydrogène quand on passe de l'éthane 1,2 diol au propane 1,2 diol et au butane 2,3 diol est vraisemblablement à rechercher dans la présence de radicaux CH_3 terminaux qui empêchent l'établissement d'une géométrie correcte pour la liaison hydrogène.

Ainsi avec les diols ne contenant que des fonctions alcool primaire, le remplissage interfoliaire se fera aisément car ces produits formeront facilement des liaisons hydrogène intermoléculaires avec les molécules de solvatation des cations.

Inversement avec le butane 2,3 diol, le développement de la phase interfoliaire à partir du diol de solvatation sera difficile, et on observera un complexe stable caractérisé par la présence d'une eau de remplissage.

3. 243. *Conclusion.*

L'étude comparative des énergies d'interaction cations-dipôles et des liaisons hydrogène intermoléculaires permet d'expliquer les différents diagrammes de sélectivité de la montmorillonite pour l'eau et les diols. En particulier, les interactions cation-dipôles imposent les distances interréticulaires et l'importance de la branche initiale de type P, alors que les liaisons hydrogène intermoléculaires gouvernent le remplissage complet de l'espace interfoliaire par le diol.

3. 3. — CONCLUSION DU CHAPITRE III

L'étude des systèmes non traités permet de définir, d'une part, l'existence de deux phases adsorbées sur l'argile et, d'autre part, les modalités du remplissage interfoliaire.

Ainsi coexistent sur l'argile une phase externe, ou phase interagrégat, dont la composition est égale à celle de la solution d'équilibre, et une phase interfoliaire dont les caractéristiques dépendent de la nature du diol et des propriétés de surface de l'argile. Toutefois la prise en considération des énergies dues aux interactions cations-dipôle et aux liaisons hydrogène intermoléculaires, permet la compréhension des différents diagrammes de sélectivité.

En particulier, le diagramme de sélectivité de la montmorillonite calcique pour l'eau et le butane 2,3 diol constitue le cas général à partir duquel tous les autres peuvent se déduire, puisque tous les stades du remplissage interfoliaire ont pu être observés expérimentalement. Ceci signifie que dans les cas simples (diols primaires), toutes les étapes du remplissage se produisent à la suite les unes des autres ou se

chevauchent, de telle sorte qu'il est impossible de les mettre en évidence. Cependant, quand un diol primaire pénètre dans l'espace interfoliaire, la diffraction des rayons X indique que le diol assure la solvatation des cations avant de se substituer à l'eau de remplissage car l'espacement de type diol est atteint avant que le recouvrement maximum des surfaces soit réalisé.

Ces observations sont importantes car elles permettent de préciser l'influence des interactions cations-dipôles et des liaisons hydrogène intermoléculaires sur la caractérisation du contenu interfoliaire. En effet, l'espacement observé aux rayons X est en relation étroite avec les propriétés de solvatation du cation (interactions cations-dipôles) alors que la composition de la phase interfoliaire dépend des liaisons hydrogène intermoléculaires.

Reçu pour publication en juillet 1976.

SUMMARY

STUDY OF THE INTERACTIONS BETWEEN CALCIUM MONTMORILLONITE WATER AND DIOLS HYDRATION OF THE MONTMORILLONITE-DIOL COMPLEXES.

I. — STUDY OF THE MONTMORILLONITE-WATER-DIOL COMPLEXES

The specific interactions between calcium ont morillonite, water and various aliphatic diols (ethanediol, propanediol 1-2, propanediol 1-3, butanediol 1-3, butanediol 1-4, butanediol 2-3, diethyleneglycol and triethyleneglycol) are studied here.

The analysis of the isotherms of water and diol adsorption by montmorillonite which relies on the calculation of selectivity diagrams and the use of X-rays and infrared spectroscopy allow to prove on the one hand the presence of stable water-diol complexes in the inter-layer spaces, the characteristics of which depend on the structure of the organic molecule, and, on the other hand, the presence of an inter-aggregate phase with a composition close to that of the equilibrium solution.

The estimate of energies of interactions between compensating cations and diol molecules and of intermolecular hydrogen bonds allows to explain the different equilibrium states observed with the various diols, especially the composition of the adsorbed phase inter-reticular spacings of clay.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN KALKHALTIGEN MONTMORILLONIT, WASSER UND DIOLEN. HYDRATATION DER MONTMORILLONIT-DIOLE KOMPLEXE.

I. — UNTERSUCHUNG DER MONTMORILLONIT-WASSER-DIOLE KOMPLEXE

In dieser Arbeit werden die spezifischen Wechselwirkungen zwischen dem kalkhaltigen Montmorillonit, dem Wasser und verschiedenen alifatischen Diolen (Aethandiol, Propandiol-(1,2), Propandiol-(1,3), Butandiol-(1,3), Butandiol-(1,4), Butandiol-(2,3), Diathylenglycol und Triathylenglycol) studiert.

Die Analyse der Isothermen von Wasser- und Dioladsorption durch Montmorillonit, die auf die Berechnung der Selektivitatdiagrammen beruht, und die Anwendung von Roentgenstrahlen und Infrarotspektroskopie führen zum Nachweis einerseits von festen Wasser-Diole Komplexen zwischen den Blättchen, deren Eigenschaften von der Struktur des organischen Moleküls abhängen und anderseits von einer Interaggregatphase, deren Zusammensetzung der Gleichgzwichtslösung nahe ist.

Die Schätzung der Energien der Wechselwirkungen zwischen den Ausgleichskationen und den Diolmolekülen und der Wasserstoffbindungen zwischen den Molekülen erlaubt, die verschiedenen mit den verschiedenen Diolen beobachteten Gleichgewichtszustände, insbesonderedie Zusammensetzung der adsorbierten Phase und der Abstände des Tons zu erklären.

РЕЗЮМЕ

Изучение взаимодействий между известковым монтмориллонитом, водой и диолами. Гидратация комплексов монтмориллонит-диолы. — I. Изучение комплексов монтмориллонит-вода-диолы.

П. ШАССЕН.

В данной работе изучались специфические взаимодействия между известковым монтмориллонитом, водой и разными алифатическими диолами (этан-диол, пропан-1-2-диол, пропан-1-3-диол, бутан-1-3-диол, бутан-1-4-диол, бутан-2-3-диол, ди и триэтиленгликол).

Анализ изотерм адсорбции воды и диолов, проведенный на базе рассчета диаграмм селективности, и применение рентгеновских лучей и инфракрасной спектроскопии, позволяют доказать присутствие, с одной стороны, стабильных комплексов вода-диол в межпластинных пространствах, причем характерности этих комплексов зависят от структуры органической молекулы, и с другой — существование межагрегатной фазы, состав которой приближается к составу равновесного раствора.

Оценка энергий взаимодействий между катионами-компенсаторами и молекулами диолов, и связей межмолекулярного водорода, позволяет об' яснить разные состояния равновесия, наблюдавшиеся при применении различных диолов, и, в особенности, состав адсорбированной фазы и межретикулярных промежутков у глины.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BANIN A., LAHAV N., 1968. Optical study of particle size of montmorillonite with various adsorbed cations. *Nature*, **217**, 1146-1147.

BELLAMY L. J., PACÉ R. J., 1972. The effect of non equivalent hydrogen bonding on the stretching frequencies of primary amines and water. *Spectrochim. Acta*, 28 A, 1869-1876.

BHAUMIK A., BHATTACHARYYA S., SEN P., 1972. Theoretical calculations on σ. Systems : part II. Alcohols Amines and amino alcohols. *Indian J. Chem.* **10** (5), 545-547.

BRADLEY W. F., 1945. Molecular associations between montmorillonite and some polyfunctional organic liquids. *J. Am. Chem. Soc.*, **67**, 975-981.

BRADLEY W. F., WEISS E. J., ROWLAND R. A., 1963. A glycol sodium vermiculite complex. *Clays and Clay Min.*, **10**, 117-122.

BRINDLEY G. W., 1970. Organic complexes of silicates : mechanisms of formation. Reunion hispano-belga de minerales de la arcilla. *C.S.I.C.*, Madrid, 55-66.

BRINDLEY G. W., ATSUMM TSUNASHIMA, 1972. Montmorillonite complexes with dioxane, morpholine and piperidine : mechanisms of formation. *Clays and Clay Min.*, **20**, 233-240.

BROWN G., 1961. *The X-Ray identifications and crystal structures of clay minerals.* 544 p. Mineralogica Society London.

BRUNAUER S., 1945. *The adsorption of gases and vapors.* 511 p. Princeton University Press.

BUC H., 1963. Liaison hydrogène intramoléculaire et isomérie de rotation dans les β diols en solution dans le tétrachlorure de carbone. *Ann. Chim.*, **8**, 409-430.

BUC H., 1963. Influence des liaisons hydrogène intramoléculaires sur les conformations prises en solution par les molécules de β-diols et d'alcool polyvinylique. *Ann. Chim.* **8**, 431-456.

CALVET R., 1972. *Hydratation de la montmorillonite et diffusion des cations compensateurs.* Thèse Fac. Sci. Paris.

CALVET R., 1972. Absorption dipolaire et conductivité de l'eau adsorbée sur la montmorillonite calcique. *Proceedings*, 1972. *International Clay Conference* (Madrid), 519-508.

CALVET R., CHASSIN P., 1973. Complexes organiques des argiles : mécanismes de formation, méthodes d'étude et application. *Bull. Groupe Français Argiles*, **25**, 87-113.

CHASSIN P., 1971. Étude de la conformation de la molécule d'éthane 1-2 diol adsorbée sur les phyllite 2/1. *Bull. Groupe Français Argiles*, **24**, 79-88.

CHASSIN P., 1975. Étude par spectroscopie infrarouge, de la nature des liaisons hydrogène contractées par les diols adsorbés sur la montmorillonite calcique. *C.R. Acad. Sci.* Paris, série D, **281**, 1451-1454.

CLEM A. G., DOEHLER R. W., 1963. Industrial applications of bentonite. *Clays and Clay Min.*, **10** 262-283.

CLOOS P., 1972. Interactions entre les pesticides et la fraction minérale du sol. *Pédologie*, **22**, 148-173.

CRUZ M., WHITE J. L., RUSSEL J. D., 1968. Montmorillonite S. triazine interactions. *Isr. J. Chem.*, **6**, 315-323.

DE BORGER J. R., 1972. État actuel de nos connaissances concernant la structure des matières organiques. *Rev. Agricult.*, **1**, 37-51.

DI MARZIO E., MAC CRACKIN F. L., 1965. One dimensional model of polymer adsorption. *J. Chem. Phys.* **43**, 539-547.

DOWDY R. H., 1966. *Alcohol water interactions on montmorillonite surfaces.* Thèse Michigan State University.

DOWDY R. H., MORTLAND M. M., 1968. Alcohol water interactions on montmorillonite surfaces. II. Ethylène glycol. *Soil Sci.* **105**, 36-40.

EISENBERG D., KAUZMANN W., 1969. *The structure and properties of water.* 296 p. Clarendon Press, Oxford.

FARMER V. C., MORTLAND M. M., 1966. An infrared study of the coordination of pyridine and water to exchangeable cations in montmorillonite and saponite. *J. Chem. Soc.* A, 344-351.

FELBECK G. T., 1971. Structural hypotheses of soil humic acids. *Soil Sci.*, **111** (1), 42-48.

FLAIG W., 1970. Contribution à la connaissance de la constitution et de la synthèse des acides humiques. *Sci. Sol*, **2**, 39-72.

GALLANT R. W., 1967 *a*. Physical properties of hydrocarbons. XIII. Ethylene glycols. *Hydrocarbon Procees*, **46** (4), 183-196.

GALLANT R. W., 1967 *b*. Physical properties of hydrocarbons. XIV. Propylene glycols and glycerol. *Hydrocarbon procees*, **46** (5), 201-215.

GLAESER R., 1953. *Complexes organo-argileux et rôle des cations échangeables.* 68 p., Thèse Fac. Sci. Paris.

GREENLAND D. J., 1965 *a*. Interaction between clays and organic compounds in soils. Part. I. Mechanisms of interaction between clays and definided organic compounds. *Soils and Fertilizers* **28**, 415-425.

GREENLAND D. J., 1965 *b*. Interaction between clays and organic compounds in soils. Part. II. Adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties. *Soils and Fertilizers*, **28**, 521-532.

GREENLAND D. J., 1971. Interactions between humic and fulvic acids and clays. *Soil Sci.*, **11**, 34-41.

GRIM R. E., 1968. *Clay mineralogy.* 596 p. McGraw Hill, New York.

HAWORTH R. D., 1971. The chemical nature of humicacids. *Soil Sci.* **111** (1), 71-79.

HENDRICKS S. B., JEFFERSON M. E., 1938. Structure of kaolin and talc pyrophyllite hydrates and their bearing on water sorption of the clays. *Amer. Mineral.*, **23**, 863-875.

HENDRICKS S. B., NELSON R. A., ALEXANDER L. T., 1940. Hydration mechanism of the clay mineral montmorillonite satured with various cations. *J. Amer. Chem. Soc.*, **62**, 1457-1464.

HENDRICKS S. B., TELLER R., 1942. X-ray interference in partially ordered layer lattices. *J. Chem. Phys.*, **10**, 147-167.

KRISHNAMURTHY S. S., SOUNDARARAJAN, 1969. Charge distribution in and dipole moments of some aliphatic alcohols. *J. Phys. Chem.*, **73** (12), 4036-4039.

KUHN L. P., 1952. The hydrogen bond I. Intra and intermolecular hydrogen bonds in alcohols. *J. Amer. Chem. Soc.*, **74**, 2492-2496.

KUHN L. P., 1954. The hydrogen bond II. The intermolecular bond in cyclic 1.2 diols. *J. Amer. Chem. Soc.*, **76**, 4323-4326.

KUHN L. P., 1958. The hydrogen bond III. The effect of the size of substituents upon the lenght of the hydrogen bond in various substituted 1.2 diols. *J. Amer. Chem. Soc.*, **80**, 5950-5954.

KUHN L. P., BOWMANN R. E., 1961. The hydrogen bond IV. Intramolecular hydrogen bonding in triols. *Spectrochim. Acta*, **17**, 650-660.

LEONARD R. A., LOW P. F., 1964. Effect of gelation on the properties of water in clay systems. *Clays and Clay Min.*, 12th Nat. Conf., 311-325.

LIPPENS B. C., DE BOER J. H., 1965. Pore systems in catalyst V. the *t*-method. *J. Catalysis*, **4** (3), 319-323.

MAC EWAN D. M. C., 1948. Complexes of clays with organic compounds I. Complex formation between montmorillonite and halloysite and certain organic liquids. *Trans. Far. Soc.*, **44**, 349-367.

MAC EWAN D. M. C., 1956. Fourier transform methods I. A direct method of analysing interstratified mixtures. *Kolloïdszchr.* **149**, 96-108.

MACEY H. H., 1942. Clay water relationship and the internal mechanism of drying. *Trans. Ceram. Soc.*, **41**, 627-631.

MAMY J., 1968. *Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite. Propriétés diélectriques et structure du film d'eau.* Thèse Fac. Sci. Paris.

MAMY J., LE RENARD, 1970. Contribution à l'étude de la structure de l'espace interfeuillet des micas altérés. Réunion hispano-belge de Minerales de la Arcilla. *C.S.I.C.*, Madrid, 17-20.

MAMY J., 1972. Relations entre les états de l'eau adsorbée par les micas altérés et leurs propriétés diélectriques. *Proceedings Int. Clay Conf., Madrid*, 509-528.

MAMY J., GAULTIER J.-P., 1972. Applications des mesures de conductivité électrique à l'étude de l'eau fixée par des phyllites gonflantes. *Bull. Groupe Français Argiles*, **25**, 43-51.

MERING J., 1946. On the hydration of montmorillonite. *Trans. Farad. Soc.*, **42** B, 205-219.

MOONEY R. W., KENAN A. G., WOOD L. A., 1952 *a*. Adsorption of water vapor by montmorillonite I. Heat of desorption and application of B.E.T. theory. *J. Amer. Chem. Soc.*, **74** (6), 1367-1371.

MOONEY R. W., KENAN A. G., WOOD L. A., 1952 *b* Adsorption of water vapor by montmorillonite. II. Effect of exchangeable ions and lattice swelling as measured by X-Ray diffraction. *J. Amer. Chem. Soc.*, **74** (6), 1371-1374.

MORTLAND M. M., 1970. Clay organic complexes and interactions. *Adv. Agron.*, **22**, 75-117.

MURRAY HAYDIN H., 1963. Industrial applications of kaolin. *Clays and Clay Min.*, **10**, 291-298.

NAHIN P. G., 1963. Perspectives in applied organo-clay chemistry. *Clays and Clay Min.*, **10**, 257-271.

ORCHISTON H. D., 1955. Adsorption of water vapor. III. Homoionic montmorillonite at 25°C. *Soil Sci.*, **79**, 71-78.

PARFITT R. L., GREENLAND D. J., 1970. The adsorption of polyetheneglycols on clay minerals. *Clay Minerals*, **8**, 306-315.

PROST R., 1975. *Étude de l'hydratation des argiles : interactions eau-minéral et mécanismes de la rétention de l'eau.* Thèse Fac. Sci. Paris.

QUIVORON C., NEEL J., 1966 *a*. Structure secondaire des polysaccharides. I. Étude par spectroscopie infrarouge, du caractère accepteur de proton des atomes d'oxygène présents dans une fonction acétal. *J. Chim. Phys.*, **63** (9), 1199-1209.

REYNOLDS R. C., 1965. An X-Ray study of an ethylene glycol montmorillonite complex. *Amer. Min.*, **50**, 990-1001.

SEIDL V., KNOP O., FALK M., 1969. Infrared studies of water in crystalline hydrates : gypsum, $CaSO_4$, 2 H_2O. *Can. J. Chem.*, **47**, 1361-1368.

SILBERBERG A., 1962 *a*. Adsorption of flexible macromolecules. I. The isolated macromolecule at a plane interface. *J. Phys. Chem.*, **66**, 1872-1883.

TALUBIDEN O., 1955. Complex formation between montmorillonoid clays and amino-acids and proteins. *Trans. Farad. Soc.*, **51**, 582-590.

THENG B. K. G., 1970. Interactions of clay minerals with organic polymers. Some pratical applications. *Clays and Clay Min.*, **18**, 357-362.

THENG B. K. G., 1971. Mechanisms of formation of colored clay-organic complexes. *Clays and Clay Min.*, **19**, 383-390.

THENG B. K. G., 1974. *The chemistry of clay-organic reactions.* 343 p., Adam Hilger London.

UCHIDA T., KURITA Y., KOIZUMI N., KUBO M., 1956. Dipole moment and the structures of polyethylene glycols. *J. Polym. Sci.*, **21**, 313-322.

VAN DIJK, 1971. Colloïd chemical properties of humic matter. *Soil Biochemistry*, **2**, 16-35.

WELLISCH E., HAGAN L., MARKER L., SWEETING O., 1961. Interaction of cellulose with small molecules. II. Ethylene diamine, ethylene glycol and tetramethylene sulfone. *J. Poly. Sci.*, **51**, 263-277.

WIESMULLER W., 1965. Untersuchung über die fraktionierung der organischen Bodensubstang. *Albrecht Thaer Archiv.* **9**, 419-436.

YARIV S., RUSSEL J. D., FARMER V. C., 1966. Infrared study of the adsorption of benzoïc acid and nitrobenzene in montmorillonite. *Isr. J. Chem.*, **4**, 201-203.

Ann. agron., 1976, **27**(4), 417-433.

PRÉSENTATION D'UNE ÉTUDE ANALYTIQUE DE L'ADVECTION

II. — Application a la mesure et a l'estimation de l'évapotranspiration

B. ITIER et A. PERRIER

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

A la suite d'une étude analytique de l'advection due aux changements de température et d'humidité de surface (Itier et Perrier, 1976 I), nous étudions les conséquences pratiques des résultats théoriques obtenus sur la mesure et l'estimation de l'évapotranspiration.

Nous montrons, dans un premier temps, comment, à partir d'une mesure ponctuelle de l'évapotranspiration, il est possible de préciser l'évapotranspiration moyenne d'un périmètre irrigué en projet ou d'un périmètre existant. La correction à apporter à une mesure ponctuelle dépend de la position de la mesure et du contraste thermique de surface. Elle est nulle si le point de mesure est situé aux 3/10 du périmètre, sous le vent.

Nous montrons, dans un deuxième temps, comment corriger une formule d'estimation de l'ETP (Penmann) en fonction des contrastes de surface et de l'extension horizontale du périmètre sur la base de données obtenues hors ou dans le périmètre irrigué.

LISTE DES SYMBOLES

A : Indice, caractérise la zone Amont ;

C (z, x) : Concentration ;

Cp : Capacité calorifique à pression constante ;

d : Longueur sous le vent d'un périmètre expérimental ;

D : Longueur sous le vent d'un périmètre irrigué ;

E_a : Pouvoir évaporant de l'air $= h \frac{LM}{RT} P' (Ta - Tr)$;

ET : Évapotranspiration ;
ETP : Évapotranspiration potentielle ;
F (x) : Fonction (voir ITIER, PERRIER, 1976 I) ;
G (z, x) : Fonction (voir ITIER, PERRIER, 1976 I) ;
h : Coefficient d'échange (h (x), h' (x) hauteur) ;
H (x) : Hauteur de la couche limite ;
k : Constante de VON KARMAN ~ 0,4 ;
K (z) : Diffusivité turbulente ;
L : Chaleur latente de vaporisation de l'eau ;
M : Masse molaire ;
P : Pression de vapeur ;
P' : Dérivée de la pression de vapeur saturante : $\delta P/\delta T$;
R : Constante des gaz parfaits ;
R_n : Rayonnement net ;
T : Température ;
T_a : Température de l'air ;
T_r : Température du point de rosée ;
U (z) : Vitesse de l'air ;
u_* : Vitesse de frottement ;
x : Distance au bord d'attaque ;
z : Hauteur ;
z_0 : Épaisseur de rugosité ;
z_r : Niveau de référence ;
β : Coefficient ;
γ : Constante psychrométrique $= \dfrac{\rho Cp\ RT}{LM}$;
Δ : Écart entre zone aval et amont ;
ρ : Densité de l'air ;
Φ : Flux ;
Φ_C : Flux de conduction ;
Φ_L : Flux de chaleur latente ;
Φ_S : Flux de chaleur sensible.

INTRODUCTION

Dans un article précédent (ITIER et PERRIER, 1976), nous avons jeté les bases d'une étude de type analytique de l'advection due à des variations de concentration de surface, ce terme étant entendu au sens large (chaleur, humidité, enthalpie ou toute autre concentration en polluant). En agronomie, où le parcellaire tend à juxtaposer des cultures de type et de stade phénologique variés, l'advection a une importance certaine. Le modèle développé dans le premier article ne traitant pas du cas où il y a changement de rugosité, nous ne parlerons ici que des cas où il y a changement de concentration de surface sans changement de rugosité. C'est, entre autres, le cas d'une différence d'humidité entre deux champs de même nature (irrigation

sélective). Pour plus de commodité, nous appellerons la zone irriguée « oasis » et la zone non irriguée « désert ». Pour ce qui concerne les notations, nous utiliserons les mêmes que dans le premier article.

I. — RAPPELS CONCERNANT LES FONCTIONS UTILISÉES (cf. ITIER et PERRIER, 1976)

A partir de trois équations de base :

— relation flux-concentration : $\Phi(z, x) = K(z) \frac{\partial}{\partial z} C(z, x)$

— équation de conservation : $U(z) \cdot \frac{\partial C}{\partial x}(z, x) = \frac{\partial}{\partial z} \Phi(z, x)$

— équation du bilan d'énergie : $R_n + \Phi_c + \Phi_S + \Phi_L = 0$.

Il a été possible de répondre aux trois questions posées :

— évolution de la couche limite de diffusion $H(x)$,

— évolution de la concentration $C(z, x)$,

— évolution du flux $\Phi(z, x)$.

En appliquant la technique de Von Karman-Polhausen et en nous plaçant dans le cas où le profil de vitesse du vent est logarithmique, nous avons pu fournir les valeurs des trois fonctions précédentes pour les trois cas particuliers, où, en fonction de x on aurait :

— concentration constante : $\Delta C_0(x) = \text{cte}, \Delta\Phi_0(x) = \text{fonc}(x)$

— flux constant : $\Delta\Phi_0(x) = \text{cte}, \Delta C_0(x) = \text{fonc}(x)$

— humidité constante : $\frac{P(x)}{P(T(x))} = \text{cte avec } P = P_{H_2O} = \frac{RT}{M} C_{H_2O}$

L'étude du troisième cas a permis d'établir que l'advection due à un changement d'humidité se ramenait aux cas du changement de concentration pour ce qui concernait l'évolution des concentrations et des flux de chacun des composants (chaleur, humidité) pris isolément (cf. fig. 1). Pour tout ce qui suivra, nous considèrerons donc que le changement d'humidité relative de surface revient à un changement de concentration de surface et que sur « l'oasis », la température et la pression de vapeur d'eau de surface sont constantes.

II. — SIGNIFICATION DES MESURES EFFECTUÉES SUR UN ÉVAPOTRANSPIROMÈTRE

A côté des études déjà nombreuses (PERRIER *et al.*, 1974) traitant de la validité des mesures effectuées sur évapotranspiromètre en fonction de leur précision et de leur représentativité par rapport à l'état moyen du champ (homogénéité des sols, de l'humidité et du couvert végétal sur et hors de l'évapotranspiromètre), on peut étudier la représentativité de la valeur fournie par l'évapotranspiromètre en fonction de sa position dans le champ, c'est-à-dire, traiter de façon numérique le problème

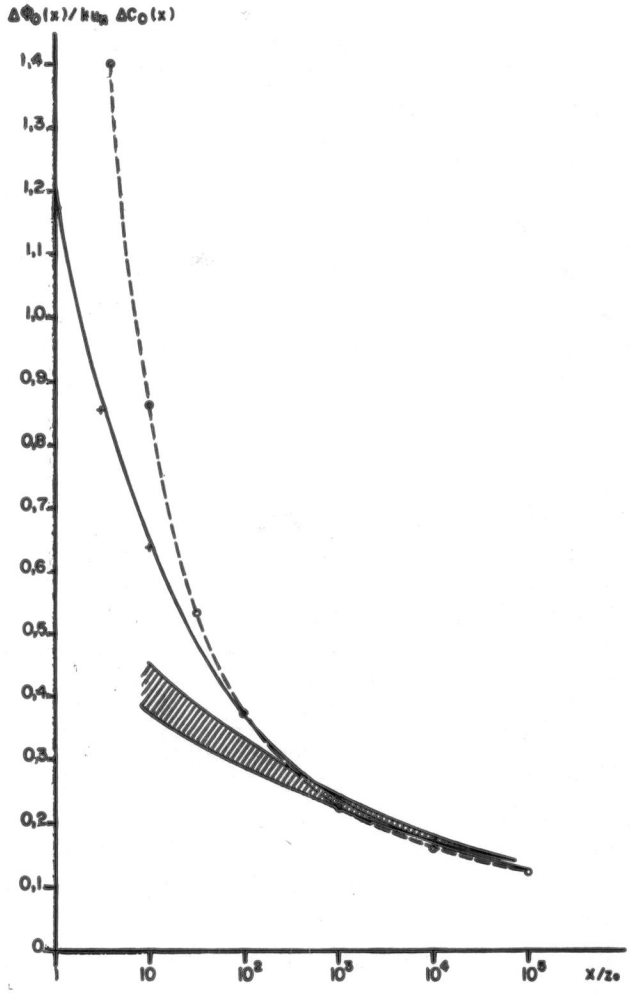


FIG. 1. — *Évolution de l'écart de flux adimensionné entre la zone aval et la zone amont en fonction du rapport de la distance* x *à l'épaisseur de rugosité* z_0 (cf. ITIER et PERRIER, 1976 I).

— — — BOUCHET *et al.*, 1974

▨ PERRIER, 1974

——— ITIER, PERRIER, 1976

+ + + TAYLOR. 1971

de l'anneau de garde. En effet, en cas d'advection, l'évolution longitudinale des flux et donc de l'évapotranspiration n'est pas linéaire (cf. fig. 1) et le point central du champ ne donne évidemment pas la valeur moyenne de l'évaporation. Il est donc intéressant, en fonction des dimensions de ce même champ d'étudier l'évolution de l'abscisse du point représentatif de la valeur moyenne de l'évapotranspiration du champ.

Le résultat de cette analyse (tabl. 1) met en évidence un rapport quasi invariant et voisin de 0,3 entre l'abscisse x où devrait se situer la position de l'évapotranspiromètre pour donner la valeur du flux moyen du champ, et sa longueur totale D dans le sens du vent :

TABLEAU I

Évolution en fonction de D/z_0 du rapport x/D tel que le flux en x soit égal au flux moyen de O à D (D dimension totale de champ, x la distance au bord du champ considéré et z_0 le paramètre de rugosité)

D/z_0	10	10^2	10^3	10^4	10^5
x/D	0,297	0,298	0,302	0,311	0,318

A partir de cette constatation, on peut essayer de répondre aux deux questions suivantes :

— quelles seraient les caractéristiques que devrait avoir une zone témoin expérimentale et préliminaire, de manière à prévoir les quantités d'eau consommées par l'installation future d'un périmètre irrigué, plus vaste ?

— quelles sont les erreurs commises sur l'estimation des besoins en eau d'un périmètre irrigué en fonction de la position de l'évapotranspiromètre installé au sein de cette zone irriguée ?

1. — *Prévision de l'évapotranspiration moyenne d'un périmètre irrigué*

Pour répondre à cette première question, deux démarches sont possibles :

— dans le cas particulier où il existe des vents dominants très prononcés, il peut suffire de créer dans le sens du vent dominant un périmètre témoin d'une longueur égale au 3/10 de celle du périmètre prévu et de placer un évapotranspiromètre près du bord opposé à celui d'où vient le vent ;

— dans le cas général, il s'agira en pratique de corriger les valeurs mesurées au centre d'un petit périmètre irrigué témoin de côté d nettement inférieur à celui du futur « oasis » (D). En effet, pour obtenir directement l'évapotranspiration moyenne qu'aurait le futur périmètre, il faudrait créer un périmètre témoin de côté égal à 0,6 D, ce qui reviendrait pratiquement à créer le périmètre final.

L'erreur entre l'évapotranspiration mesurée au centre d'une parcelle de diamètre d et la valeur moyenne vraie du futur « oasis » de diamètre D pourra être estimée de la façon suivante :

— L'évapotranspiration moyenne sur le futur « oasis » est :

$$\overline{\Phi_L (D)} = \Phi_L (0{,}3\ D) \qquad (1)$$

— L'évapotranspiration mesurée au centre de « l'oasis témoin » est de même :

$$\Phi_{Lm} = \Phi_L\,(d/2)$$

— L'erreur $\delta\Phi$ sur l'estimation de l'évapotranspiration sera, si l'on pose $\Delta\Phi\,(x) = \Phi_L\,(x) - \Phi_{LA}$:

$$\delta\Phi_L = \Phi_{Lm} - \overline{\Phi_L\,(D)} = \Delta\Phi_L\,(d/2) - \Delta\Phi_L\,(0{,}3\ D)$$

Posons :

$$\beta = \Delta\Phi_L\,(d/2)/\overline{\Delta\Phi_L\,(D)},$$

coefficient dépendant de D et d ou de D et du rapport d/D, et dont la variation a été portée sur la figure 2.

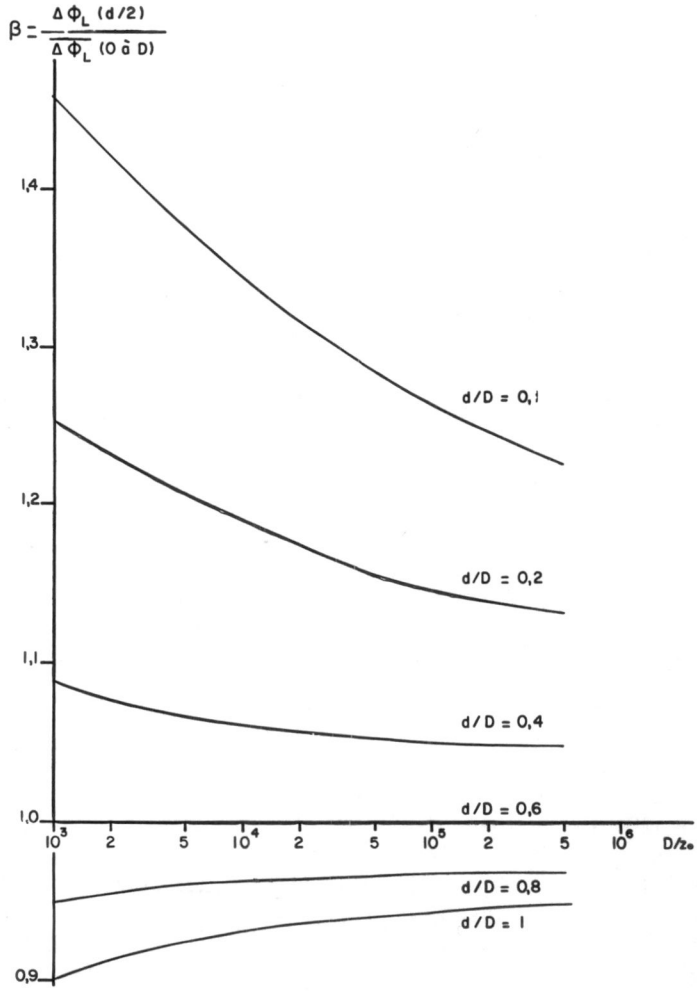


FIG. 2. — *Évolution du rapport entre l'évaporation mesurée en un point d'abscisse* $d/_2$ *et l'évaporation moyenne d'un périmètre irrigué de côté* D *en fonction de* D/z_0, *du rapport* d/D *et de la valeur du flux en zone amont (car* $\Delta\Phi = \Phi - \Phi_A$)

— L'erreur sur l'estimation s'écrira :

$$\delta\Phi_L = (\beta - 1)\ \overline{\Delta\Phi_L\ (D)} \quad \text{ou} \quad (\beta - 1)\ \Delta\Phi_L\ (0{,}3\ D)$$

d'où :

$$\delta\Phi_L = \frac{(\beta - 1) \cdot ku^* \ \Delta C_0}{F\ (0{,}3 \cdot D/z_0)} \text{ (Cf. ITIER et PERRIER, 1976 I)} \qquad (2)$$

La correction à apporter aux valeurs mesurées sur l'évapotranspiromètre placé au centre de « l'oasis témoin » dépendra de trois paramètres :

— $(\beta - 1)$ coefficient dont la valeur sera d'autant plus importante que le rapport d/D est différent de 0,6 (fig. 2).

— ΔC_0, écart de concentration entre « l'oasis et le désert ».

Cet écart pourra s'écrire, selon qu'on l'exprime en fonction de l'écart de température de surface ou de pression de vapeur d'eau à la surface :

$$\Delta C_0 = LM/RT \cdot \Delta P_0$$

ou

$$\Delta C_0 = \rho Cp \cdot \Delta T_0$$

— D, la dimension du futur « oasis ». Pour un même rapport d/D, l'erreur sera d'autant moins forte que D est grand ; mais (cf. fig. 2) pour un oasis témoin de dimension d fixée, l'erreur diminuera tant que d/D sera supérieur à 0,6 puis augmentera pour toute valeur de d/D inférieure à cette limite.

2. — *Détermination de l'erreur sur l'évaluation de la consommation en eau d'un périmètre irrigué en fonction de l'emplacement de l'évapotranspiromètre*

La réponse à cette deuxième question se trouve pratiquement résolue par l'analyse précédente. En effet, si x est la distance, dans le sens du vent, au bord du périmètre irrigué de l'évapotranspiromètre utilisé, l'erreur commise par rapport au flux moyen du périmètre de diamètre D se détermine aisément à partir des données de la fig. 2. La distance x de l'évapotranspiromètre au bord d'attaque correspond à un diamètre de parcelle expérimentale $d = 2\ x$ et le rapport d/D ainsi calculé permet de déterminer le coefficient β de correction.

L'erreur sera d'autant plus importante que la distance au bord d'attaque s'écarte davantage des 3/10 de la dimension D du périmètre irrigué. La courbe la plus basse de la figure 2 $\left(\frac{d}{D} = 1\right)$ représente l'évolution de l'erreur en fonction de la dimension du périmètre irrigué lorsque l'évapotranspiromètre est placé en son centre, erreur qui dans ce cas ne dépasse pas 10 p. 100.

A titre d'exemple, pour un périmètre irrigué de côté D = 1 km et de rugosité $z_0 = 1$ cm, le tableau 2 retrace l'évolution, en fonction de la distance x au bord du périmètre dans la direction des vents dominants, du rapport $\Phi_{Lm}\ (x)/\Phi_L\ (D)$ entre la valeur du flux mesurée et celle recherchée qui correspond à la consommation en eau du périmètre. Dans cet exemple, on a supposé que le flux de chaleur latente sur la zone amont ou « désert » Φ_{LA}, était égal à — 150 Wm^{-2} et que le contraste entre

« l'oasis » et le « désert » était voisin de 1 000 Wm^{-2} ($\rho C\, k\, u_* \,\Delta T_0 \sim -1\,000\ Wm^{-2}$). Dans ces conditions, on aura (cf. fig. 1) :

$$\overline{\Phi_L\,(D)} = \Phi_L\,(0{,}3\ D) = \Delta\Phi_L\,(0{,}3\ D) + \Phi_{LA} = -440\ Wm^{-2}$$

$$\frac{\Phi_L\,(x)}{\overline{\Phi_L\,(D)}} = 1 + (\beta - 1)\cdot\left(\frac{1}{1 + \dfrac{\Phi_{LA}\cdot F\,(0{,}3\ D/z_0)}{\rho\ Cp\ k\ u_*\ \Delta T_0}}\right) \tag{3}$$

$$= 1 + (\beta - 1)\,\frac{290}{440}$$

TABLEAU 2

x/D	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
$\beta - 1$	0,263	0,147	0,05	0	— 0,033	— 0,058	— 0,08	— 0,11	— 0,13
$\varnothing_L$	76,5	42,7	14,5	0	— 9,7	— 16,8	— 23,2	— 30,4	— 37,6
$\dfrac{\varnothing_L(x)}{\varnothing_L(D)}$	1,175	1,097	1,033	1	0,978	0,962	0,947	0,927	0,914

Ce tableau montre que pour obtenir la valeur du flux moyen du champ, à mieux de 10 p. 100, il faudra, dans les conditions définies plus haut, placer l'appareil de mesure à une distance du bord d'attaque supérieur à 1/10 de D, c'est-à-dire, à plus de 100 mètres pour un champ de 1 km.

Il convient toutefois de souligner, que cette contrainte dépend des conditions expérimentales ; à la limite, si le contraste est nul, on peut placer l'appareil n'importe où. Pour un même contraste, il faudra se placer d'autant plus près de la position $x = 0{,}3$ D que le rapport Φ_{LA}/Φ_L (D) sera différent de 1 (tabl. 3).

TABLEAU 3

Valeurs de $\varnothing_L(x)/\varnothing_L(D)$ *pour*
$\rho Cpku_*\ \Delta T_0 = 1\,000\ Wm^{-2}$, $z_0 = 10^{-2}$ m,
$D = 1$ km et $\varnothing_L(D) = \varnothing_{LA} - 290$

	X/D								
$\varnothing_{LA}$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
0	1,263	1,146	1,05	1	0,966	0,942	0,920	0,894	0,872
— 150	1,175	1,097	1,033	1	0,978	0,962	0,947	0,927	0,914
— 300	1,13	1,072	1,025	1	0,983	0,971	0,96	0,948	0,936

Nota : Il est d'autre part, bien évident, que si Φ_{LA}/Φ_L (D) est plus proche de 1 (soit ici : $\Phi_{LA} = -300$), le contraste $\rho\ Cp\ k\ u_*\ \Delta T_0$ a toute chance d'être plus faible, ce qui renforce la tendance indiquée par le tableau.

III. — REPRÉSENTATIVITÉ DE LA FORMULE DE PENMANN

Après avoir analysé le problème de la mesure directe, il est à présent intéressant d'étudier celui lié à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle ETP par la formule de Penmann :

$$\mathrm{ETP} = \frac{\mathrm{P}' \, \mathrm{R}_n + \gamma \mathrm{E}_a}{\mathrm{P}' + \gamma}$$

avec $\mathrm{E}_a = h \, \rho \, \mathrm{Cp} \, \frac{\mathrm{P}'}{\gamma} (\mathrm{T}_a - \mathrm{T}_r)$, h étant le coefficient d'échange entre la surface et le niveau de mesure z_r de T_a et T_r, et γ la constante psychrométrique.

Comme précédemment, on pourra diviser cette étude en deux parties :

— quelle erreur commet-on sur l'estimation de l'évapotranspiration d'un périmètre irrigué, lorsque celui-ci, étant à l'état de projet, on établit cette estimation à partir de mesures (T_a, T_r, R_n et rugosité) effectuées sur la zone sèche ?

— quelle erreur commet-on lorsque, le périmètre existant, on estime l'évaporation en un point au moyen des caractéristiques de l'air mesurées en ce point ?

1. — *Prévision de l'évapotranspiration moyenne d'un périmètre irrigué à partir de l'estimation par la formule de Penmann calculée avant irrigation*

La réponse à la première question est obtenue au moyen de la relation (voir annexe n° 1) :

$$\frac{\mathrm{ET}_x - \mathrm{ETP}}{\rho \, \mathrm{Cp} \, k \, u_* \, \Delta \mathrm{T}_0} = \left\{ \frac{1}{\mathrm{F}\left(\frac{\mathrm{H}(x)}{z_0}\right)} - \frac{1}{\mathrm{Log}\left(\frac{z_r + z_0}{z_0}\right)} \right\} \tag{4}$$

où ET_x est la vraie valeur de l'évapotranspiration sur un périmètre irrigué à une distance x du bord d'attaque.

Choisissant un niveau de référence z_r constant et égal à 2 mètres, on a illustré les résultats de cette relation au moyen de la figure 3 où l'on voit que l'erreur varie en fonction de la distance x et de la rugosité z_0, s'annulant généralement pour une certaine distance x comprise entre 10 et 100 mètres.

L'erreur est d'autant plus forte, en dehors de cette zone, que z_0 est grand. En advection sèche (zone amont plus sèche), cette erreur conduit à une sous-estimation de l'évapotranspiration dans les 50 premiers mètres, puis à une surestimation.

L'évolution en fonction de z_0 du point x où l'estimation donnée par la formule de Penmann est égale à la mesure ponctuelle, est présentée sur la figure 4 et montre un bon accord avec les quelques points obtenus par PERRIER (1974).

Comme l'évapotranspiration à une abscisse x (ET_x) représente l'évapotranspiration moyenne d'un champ de dimension $\mathrm{D} = 3{,}33\, x$, la courbe $\mathrm{D}^* = \frac{10}{3} x^*$ représente donc la dimension des parcelles qui, en fonction de z_0 et quelle que soit l'intensité de l'advection, ont pour évapotranspiration moyenne la valeur estimée par la formule de Penmann.

On constate que, pour les valeurs de z_0 les plus courantes (1 à 5 cm), cette dimension de parcelle est de l'ordre de 100 à 150 m, ce qui, compte tenu des dimensions les plus fréquentes dans nos régions, explique assez bien la précision acceptable obtenue par cette formule d'estimation.

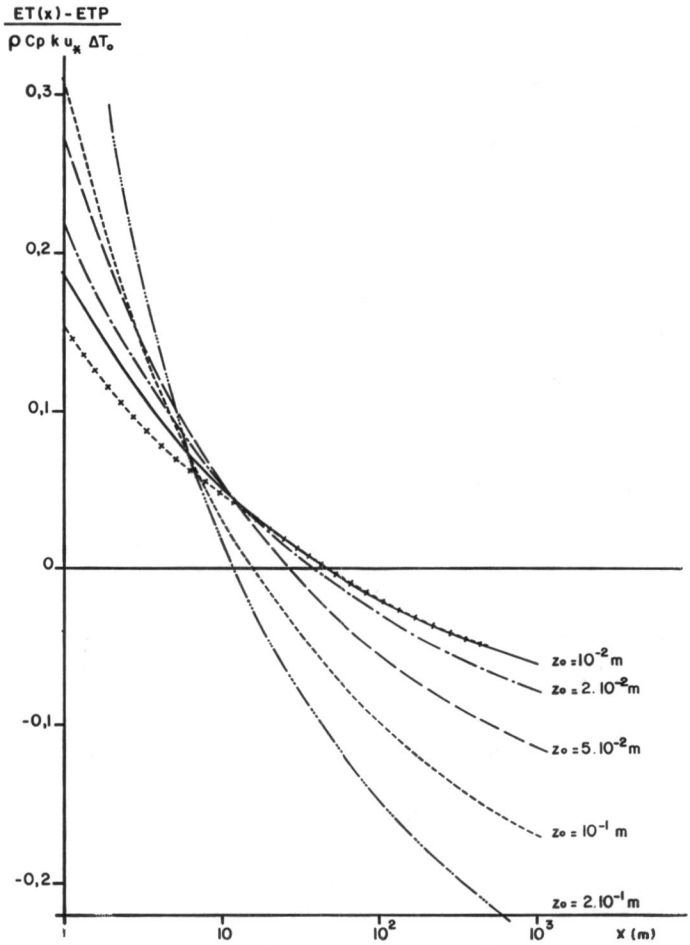


FIG. 3. — *Évolution de la différence entre la valeur de l'évaporation ET* (x) *et l'estimation donnée par la formule de* PENMANN ETP (calculée à partir des données de la zone amont pour une hauteur de référence $z_r = 2$ m) *en fonction de la distance au bord d'attaque et pour différentes rugosités.*

Pour des parcelles de dimensions différentes, la formule précédente permet de corriger l'estimation de l'ETP et d'établir, *a priori*, la consommation moyenne d'un périmètre. En effet, d'après les relations 1 et 4, nous aurons :

$$\overline{\mathrm{ET}\,(\mathrm{D})} = \mathrm{ETP} + \left(\frac{(\mathrm{ET}_x - \mathrm{ETP})}{\rho\ \mathrm{Cp}\ k\ u_*\ \Delta\mathrm{T}_0}\right)_{x\,=\,0{,}3\ \mathrm{D}} \rho\ \mathrm{Cp}\ k\ u^*\ \Delta\mathrm{T}_0 \qquad (5)$$

Il s'agit pour cela de connaître z_0, u_* et ΔT_0.

Les deux premiers termes sont déterminés à partir de l'étude des profils verticaux de vitesse du vent.

Le troisième peut, quant à lui, être :

— soit observé directement sur une toute petite surface puisque (cf. ITIER et PERRIER, 1976, I), le contraste thermique entre deux zones d'humidité différente est pratiquement indépendant de la dimension respective des surfaces ;

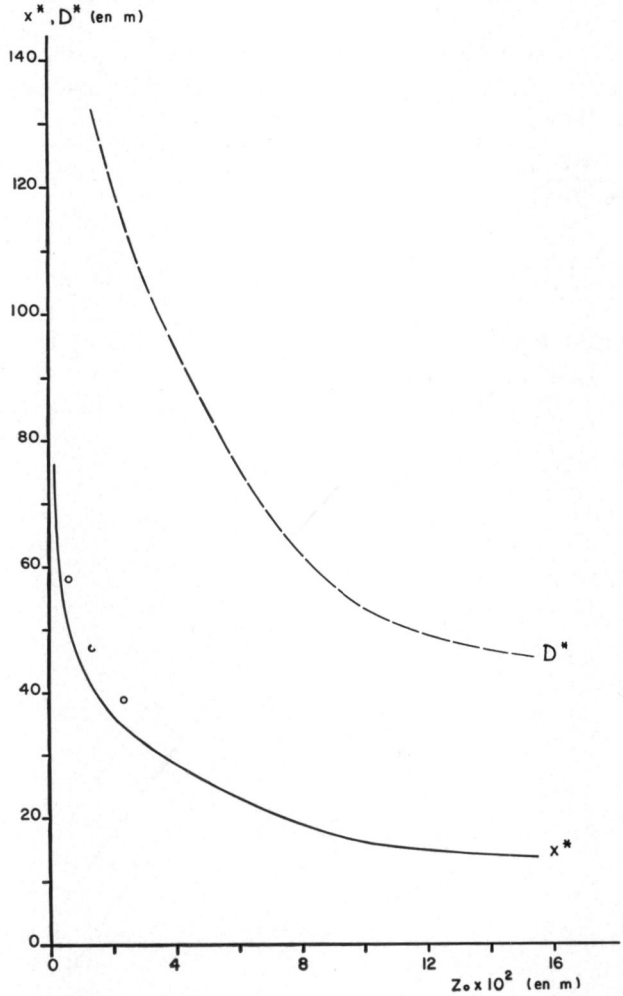


FIG. 4. — *Évolution en fonction de* z_0 *de la distance* x^* *pour laquelle il y a égalité entre flux et l'estimation de* PENMANN (calculée sur la zone amont $z_0 = 2$ m) ; *les points représentent les valeurs obtenues par* PERRIER (1974). D* *définit la dimension de la parcelle dont l'évaporation moyenne est égale à l'estimation de* PENMANN *calculée sur la zone amont* ($z_r = 2$ m).

— soit déterminé par le calcul après estimation de la température du point de rosée (T_{r0}) sur zone non irriguée (zone amont) puisque (cf. PERRIER, 1975) :

$$\Delta T_0 \sim -\frac{P'}{P' + \gamma}(T_0 - T_{r0})_A$$

2. — *Différence entre l'évapotranspiration et son estimation* (ETP_x) *à partir des données obtenues en un point* x *sur zone irriguée*

La deuxième question est, quant à elle, résolue à partir de l'équation (cf. annexe 2) :

$$\frac{ET_x - ETP_x}{\rho\, Cp\, k\, u_*\, \Delta T_0} = \left\{ \frac{G\,(H/z_0,\, z_r/z_0)}{Log\left(\dfrac{z_r + z_0}{z_0}\right)} - 1 \right\} \frac{1}{F\,(H/z_0)} \qquad (6)$$

Deux résultats méritent d'être soulignés : d'une part l'expression (6) est pratiquement indépendante de z_0 ; d'autre part l'erreur diminue très rapidement en fonction de la distance au bord d'attaque (fig. 5).

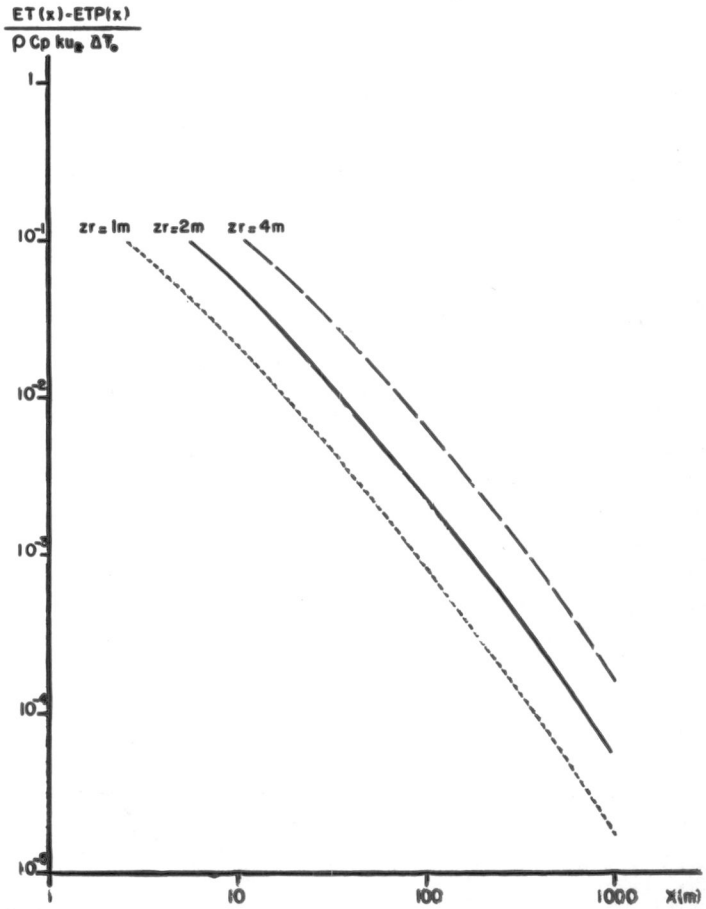


FIG. 5. — *Évolution en fonction de la distance* x *de l'écart entre l'évapotranspiration à l'abscisse* x *et l'estimation de* PENMANN *calculée à partir des valeurs mesurées à la même abscisse pour différentes hauteurs de référence* (z_r).

Dans l'exemple choisi ($z_r = 2$ m), compte tenu d'une valeur de $|\rho\, Cp\, k\, u_*\, \Delta T_0|$ voisine de 1 000 Wm^{-2}, l'erreur absolue commise en prenant les caractéristiques de l'air à 40 mètres du bord est égale à 10 Wm^{-2}, erreur inférieure à celle découlant

des mesures. Il est donc intéressant de noter que pour des distances supérieures à 50 ou 100 m, quelle que soit l'intensité de l'advection et la valeur de la rugosité, l'erreur de détermination de l'évapotranspiration potentielle locale est inférieure à quelques Wm^{-2} et échappe par conséquent à tout contrôle expérimental. Il découle aussi de la relation ci-dessus, que l'erreur serait moindre pour une hauteur de référence plus basse, et supérieure pour une hauteur de référence plus haute (fig. 5).

Ce résultat est d'ailleurs étroitement lié au résultat analysé dans un article précédent (ITIER et PERRIER, 1976) définissant la hauteur $h'(x)$ pour laquelle le flux est conservatif à une valeur donnée près δ (en Wm^{-2}) ; ainsi, pour tout x donnant un $h'(x)$ inférieur au z_r choisi, l'erreur sera supérieure à δ, puis pour tout x conduisant à $h'(x) > z_r$, l'erreur décroîtra pour tendre vers zéro.

CONCLUSION

Il est important de souligner que les quelques applications agronomiques étudiées ici à la suite d'un article théorique précédent (ITIER et PERRIER, 1976) ne sont valables que dans le cadre restreint des conditions de l'étude théorique, c'est-à-dire, lorsqu'il y a changement de l'état de surface (concentration, température, humidité) sans changement de rugosité.

En d'autres termes, il est possible de les utiliser pour étudier les flux et les concentrations résultant de l'irrigation d'une parcelle entourée d'autres parcelles non irriguées de même nature. Leur emploi ne constiturait qu'une approximation dans l'étude de l'évolution des flux sur un champ de maïs, lorsque celui-ci est entouré de chaume de blé, car dans ce dernier cas, il y a changement de rugosité (lié de plus à un changement de hauteur).

Ainsi, la mesure de l'évapotranspiration avec un évapotranspiromètre placé au centre d'une parcelle ou d'une zone plus étendue, n'est représentative que de l'abscisse du point de mesure et sous-estimera toujours les valeurs moyennes de l'évapotranspiration du périmètre irrigué considéré. Seule une mesure à une distance de 0,3 fois la longueur du périmètre dans le sens du vent conduirait à une bonne estimation de l'évapotranspiration moyenne, mesure qui n'est possible que dans le cas d'une zone à vent dominant. Les résultats concernant le coefficient β (rel. 2, tabl. 2, fig. 2) montrent qu'il est possible de corriger approximativement toute mesure pour déterminer l'évapotranspiration moyenne. D'autre part, cette valeur moyenne sera presque toujours différente de celle que donnerait par exemple la formule de Penmann, soit que cette dernière résulte de mesures faites en amont (ce qui conduirait en principe à l'estimation de l'ETP climatique de la région), soit qu'elle résulte des mesures faites au sein du périmètre (irrigué par exemple). Dans les deux cas, les erreurs peuvent être estimées et servir à corriger, en fonction du but recherché, les valeurs obtenues par les formules. De façon générale toutefois, et compte tenu des conditions moyennes de dimension de parcelles et des rugosités les plus souvent observées, au moins dans nos régions, l'application de la formule de Penmann conduit à une assez bonne mesure de l'évapotranspiration potentielle ($\sim$ 5 p. 100).

Pour ce qui concerne, enfin, l'application pratique au calcul des quantités d'eau nécessaire à l'irrigation, deux possibilités sont à envisager :

— soit apporter une quantité d'eau différente en fonction de la distance, c'est-à-dire, moduler l'offre en fonction de la demande ET (x), et ce notamment pour les grands périmètres ;

— soit apporter la même valeur $\overline{ET}$ quelque soit x, mais en sachant que les premiers 3/10 du champ seront sous-alimentés alors que les 7/10 restants seront suralimentés. Il restera alors à déterminer (DE VRIES, 1959 ; MILLAR, 1964) l'influence de cette sous-alimentation sur l'état hydrique des rangs de bordure.

Reçu pour publication en juillet 1976.

SUMMARY

ANALYTICAL STUDY OF LOCAL ADVECTION
II. — APPLICATION TO THE MEASUREMENT AND ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION

Following an analytical study of local advection due to changes in surface temperature or humidity (ITIER, PERRIER, 1976 I), we develop here some applications relevant to the measurement or estimation of evapotranspiration.

Firstly we show how to adjust a local measurement of evapotranspiration in order to estimate the mean evapotranspiration of an irrigated area or to forecast it for a projected one. The adjustment is a function of the position of measurement and of the surface thermal contrast. No adjustment may be necessary if measurements are taken at 3/10th of the distance downwind from the leading edge.

Secondly, we show how to correct Penman's potential evapotranspiration formula to take into account horizontal thermal contrasts and the downwind length of the irrigated area.

ZUSAMMENFASSUNG

BESCHREIBUNG EINER ANALYTISCHEN UNTERSUCHUNG DER ADVEKTION
II. — ANWENDUNG AUF DIE MESSUNG UND SCHAETZUNG DER EVAPOTRANSPIRATION

Nach einer analytischen Untersuchung der durch Schwankungen der Oberflächentemperatur und -feuchtigkeit bedingten Advektion (ITIER und PERRIER, 1976 I) werden die praktischen Folgen der erzielten theoretischen Ergebnisse für die Messung und Schätzung der Evapotranspiration studiert.

Es wurde erstens gezeigt, wie es möglich ist, die mittlere Evapotranspiration einer geplanten bewässerten Gürtel oder einer vorhandenen Gürtel von einer Punktmessung der Evapotranspiration ab zu bestimmen. Der Ausgleich der Punktmessung hängt von der Messstelle und dem oberflächichen Wärmekontrast ab. Er ist unbedeutend wenn die Messstelle zum 3/10 der Gürtel vor dem Winde liegt.

Es wurde ferner gezeigt, wie eine Formel für die Schätzung der potentiellen Evapotranspiration (Penman) in Beziehung zu den Oberflächenkontrasten und des horizontalen Umfangs der Gürtel auf Grund der ausserhalb oder in der bewässerten Gürtel erzielten Daten ausgeglichen sein kann.

РЕЗЮМЕ

Аналитическое изучение адвекции. — II. Применение при измерении и оценке эвапотранспирации.

Б. ИТЬЕ, А. ПЕРРЬЕ.

Проведя аналитическое изучение адвекции, вызванной изменениями температуры и влажности на поверхности (Итье и Перрье, 1976-1), авторы предприняли изучение практических последствий теоритических результатов, полученных при измерении и оценке эвапотранспирации.

В первую очеердь, в данной работе указывается каким образом, исходя от точного измерения эвапотранспирации, возможно уточнить среднюю эвапотранспирацию предназначенного для орошения, или уже орошаемого периметра. Поправка, которую необходимо ввести для точного измерения зависит от позиции измерения и от теплового контраста поверхности, и она не вносится, если пункт измерения расположен в 3/10 периметра, под ветром.

И, затем, указываются способы исправления формулы оценки Е.Т.Р. (Пенман) на базе данных полученных вне, или внутри орошаемого периметра, в зависимости от контрастов поверхности и от его горизонтального растяжения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bouchet R. J., Fortin J. P., Seguin B., 1974. Modification des facteurs climatiques de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par l'irrigation. *Soc. Hydrotech. de France*, 13e journée de l'hydraulique, Paris, sept. 1974.

De Vries D. A., 1959. The influence of irrigation on the energy balance and the climate near the ground. *Journal of Meteorology*, **16**, 256-270.

Itier B., Perrier A., 1976. Présentation d'une étude analytique de l'advection : I. — Advection liée aux variations horizontales de concentration et de température. *Ann. agron.* **27** (2), 111-140.

Millar B. D., 1964. Effet of local advection on evaporation rate and plant water status. *Aust. J. Agric. Res.*, **15**, 85-90.

Penmann H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc.*, Londres, A **193**, 120-145.

Perrier A., Archer Ph., Blanco de Pablos A., 1974. Étude de l'évaporation réelle et maximale de diverses cultures : dispositif et mesures. *Ann. agron.*, **25** (5), 697-731.

Perrier A., 1974. Advection et variations microclimatiques. *Soc. Hydrotechn. de France*, 13e journée de l'hydraulique, Paris, septembre 1974.

Perrier A., 1975. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles, II. — Expression et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface mince. *Ann. agron.*, **26** (2), 105-123.

Taylor P. A., 1970. A model of airflow changes in surface heat flux, temperature and roughness for neutral and instable conditions. *Boundary layer Meteorol.*, **1**, 18-39.

ANNEXES

1. — *Calcul de ET (x) — ETP* (Penmann)

$$\text{ETP (Penmann)} = \frac{P' R_n + \gamma E_a}{P' + \gamma}$$

avec
$$\gamma E_a = h\,\rho\,Cp\,P'\,(T - T_r)_A \text{ (mesuré sur zone amont)}$$
$$= h\,\rho\,Cp\,P'\,(T - T_0 + T_0 - T_{r0} + T_{r0} - T_r)_A$$
$$= h\,\rho\,Cp\,P'\left\{\frac{\Phi_A}{\rho\,Cp\,h} + (T_0 - T_{r0})_A - \frac{\gamma}{P'}\frac{\Phi_{LA}}{\rho\,Cp\,h}\right\}$$

et donc :

$$\gamma\,E_a = P'\,\Phi_A - \gamma\,\Phi_{LA} + h\,\rho\,Cp\,P'\,(T_0 - T_{r0})_A$$

or (cf. PERRIER, 1974), le déficit de saturation de surface peut être relié à l'écart de température entre la température T_0 de surface et celle qu'elle aurait si elle était saturée en eau.

$$(T_0 - T_{r0})_A = -\frac{P' + \gamma}{P'}\,\Delta T_0\,(x)$$

donc :

$$\text{ETP} = \frac{P'}{P' + \gamma}\left[R_n + \Phi_A - \frac{\gamma}{P'}\,\Phi_{LA}\right] - h\,\rho\,Cp\,\Delta T_0\,(x)$$

et puisque : $R_n + \Phi_A + \Phi_L \sim 0$ (équation du bilan d'énergie) :

$$\text{ETP} = -\,\Phi_{LA} - h\,\rho\,Cp\,\Delta T_0\,(x)$$

ce qui conduit, en exprimant h :

$$h = 1/\int_0^{z_r} \frac{dz}{k\,u_*\,(z + z_0)} \text{ avec } z_r \text{ niveau de référence,}$$

à :

$$\text{ETP (Penmann)} = -\,\Phi_{LA} - \rho\,Cp\,k\,u_*\,\Delta T_0\,(x)/\text{Log}\,\frac{(z_r + z_0)}{z_0}$$

or, il a été établi que : (cf. ITIER et PERRIER, 1976 I) :

$$\text{ET}\,(x) = -\,\Phi_L\,(x) = -\,\Phi_{LA} - \rho\,Cp\,k\,u_*\,\Delta T_0\,(x)/F\left(\frac{H\,(x)}{z_0}\right)$$

il en résulte que :

$$\text{ET}\,(x) - \text{ETP} = \rho\,Cpk\,u_*\,\Delta T_0\,(x)\left\{\frac{1}{\text{Log}\,\dfrac{z_r + z_0}{z_0}} - \frac{1}{F\left(\dfrac{H\,(x)}{z_0}\right)}\right\}$$

2. — *Calcul de ET (x) — ETP (x)*

$$\mathrm{ETP}\,(x) = \frac{\mathrm{P'R}_n + \gamma\,\mathrm{E}_a\,(x)}{\mathrm{P'} + \gamma}$$

$$= \mathrm{ETP}\ (\mathrm{Penmann})_{\mathrm{A}} + \frac{\gamma}{\mathrm{P'} + \gamma}\left[\mathrm{E}_a\,(x) - \mathrm{E}_a\right]$$

$$= \mathrm{ETP} + h\,\rho\,\mathrm{Cp}\,\frac{\mathrm{P'}}{\mathrm{P'} + \gamma}\left[\Delta\mathrm{T}\,(z_r, x) - \Delta\mathrm{T}_r\,(z_r, x)\right]\ (z_r \text{ niveau de mesure})$$

or (cf. Itier et Perrier, 1976 I) :

$$\Delta\mathrm{T}_r \quad \text{ou} \quad \Delta\mathrm{T}\,(z_r, x) = \Delta\mathrm{T}_{r0} \quad \text{ou} \quad \Delta\mathrm{T}_0\,(x)\left[1 - \mathrm{G}\,(z_r, x)/\mathrm{F}\,(x)\right]$$

donc :

$$\mathrm{ETP}\,(x) = \mathrm{ETP} + h\,\rho\,\mathrm{Cp}\,\frac{\mathrm{P'}}{\mathrm{P'} + \gamma}\left[\Delta\mathrm{T}_0\,(x) - \mathrm{T}_{r0}\,(x)\right] \cdot (1 - \mathrm{G/F})$$

et, comme (cf. annexe 1)

$$\Delta\mathrm{T}_0\,(x) - \Delta\mathrm{T}_{r0}\,(x) = -\,(\mathrm{T}_0 - \mathrm{T}_{r0})_{\mathrm{A}} = \frac{\mathrm{P'} + \gamma}{\mathrm{P'}}\,\Delta\mathrm{T}_0\,(x)$$

$$\mathrm{ETP}\,(x) = \mathrm{ETP} + \rho\,\frac{\mathrm{Cp}\,k\,u_*\,\Delta\mathrm{T}_0}{\mathrm{Log}\,\dfrac{z_r + z_0}{z_0}}\,(x) \cdot (1 - \mathrm{G}\,(z_r, x)/\mathrm{F}\,(z_r, x))$$

ce qui conduit, compte tenu des résultats de l'annexe I, à :

$$\frac{\mathrm{ET}\,(x) - \mathrm{ETP}\,(x)}{\rho\,\mathrm{Cp}\,k\,u_*\,\Delta\mathrm{T}_0\,(x)} = \left(\frac{\dfrac{\mathrm{G}\left(\dfrac{z_r}{z_0}, \dfrac{x}{z_0}\right)}{\mathrm{Log}\left(\dfrac{z_r + z_0}{z_0}\right)} - 1}{\mathrm{F}\,(x/z_0)}\right)$$

Ann. agron., 1976, **27** (4), 435-445.

RELATIONS ENTRE L'ÉCLAIREMENT DES FEUILLES ET L'ABSORPTION D'OXYGÈNE PAR LES RACINES CHEZ LE TOURNESOL (*HELIANTHUS ANNUUS* L.)

J. S. FROSSARD

avec la collaboration technique de M. MARTIGNAC et H. RAYNAUD

Laboratoire de Bioclimatologie,
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I. N. R. A.,
12, avenue de l'Agriculture
63100 Clermont-Ferrand

RÉSUMÉ

L'étude concerne l'action de l'éclairement des parties épigées du Tournesol sur la respiration des racines prises comme reflet de leur activité métabolique.

La respiration est appréciée d'après l'absorption de l'oxygène de la solution nutritive, en condition de teneurs en oxygène non limitantes pour l'activité racinaire.

Une variation rythmique de l'absorption, calquée sur la succession des temps d'éclairement et d'obscurité, a été observée. L'ablation foliaire et l'obscurité prolongée provoquent une chute importante, mais plus ou moins rapide, de l'absorption d'oxygène.

Il en est conclu que l'activité racinaire est commandée principalement par les flux trophiques liés aux rythmes d'éclairement. Cependant, la non-existence d'un rythme endogène ne peut pas être parfaitement démontrée.

I. — INTRODUCTION

Comme le fonctionnement des parties aériennes, l'activité racinaire est soumise aux facteurs climatiques (KRAMER, 1969). En outre, il existe entre système racinaire et parties épigées, des liaisons étroites à tout niveau de fonctionnement (PÉRIGAUD, 1967 ; KAZARJAN, 1969 ; MAERTENS, 1971 ; MORIZET, 1975).

Ceci conduit, dans l'étude des relations entre l'environnement physique et l'activité d'un organe, à ne pas négliger la réponse des autres parties de la plante et ses répercussions sur le fonctionnement de l'organe étudié.

Notre objectif général étant d'apprécier la respiration des racines — globalement représentative de l'activité métabolique de cet organe — en fonction de différents paramètres d'ordre biologique ou physique, la remarque précédente nous conduit à l'étude préalable de facteurs affectant la plante dans son ensemble.

Cette première note a pour but :

— de définir la méthodologie adoptée,

— de donner un aperçu de la dynamique du phénomène vu à l'échelle des rythmes naturels de l'environnement.

Le rythme envisagé ici sera le rythme nycthéméral dont nous retiendrons, pour l'instant, uniquement l'effet lumière. Celui-ci a déjà été observé, notamment sur le Tabac, le Maïs, le Coton (HUCK *et al.*, 1962; HARRIS et VAN BAVEL, 1967) et le Blé (OSMAN, 1971).

Nous proposerons enfin des éléments d'explication du rythme observé.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. — *Conditions de culture*

Les expériences ont été réalisées sur le Tournesol, *Helianthus annuus* L., variété « *INRA* 6501 ».

Après semis et levée sur vermiculite, les plantes sont élevées sur solution nutritive (composition au tabl. 1), convenablement aérée, en chambre climatisée, dans les conditions suivantes :

— température : 20°C ± 0,5°C,

— degré hygrométrique : 70 p. 100 ± 5 p. 100,

— éclairement : 25 000 lux,

— durée d'éclairement sur vingt-quatre heures : douze heures.

Les plantes sont mises en condition de contrôle lorsqu'elles ont atteint un stade qui peut se caractériser ainsi :

— âge : 30 jours,

— nombre de feuilles : 7 à 9,

— surface foliaire : environ 450 cm²,

— poids frais des racines : environ 19 g.

TABLEAU I

Composition de la solution nutritive			Concentration ionique en milliéquivalent pour les macro-éléments				
Macro-éléments :			Cations \ Anions	NO_3^-	$H_2PO_4^-$ HPO_4^{2-}	SO_4^{2-}	T
$NaCl$	10	mg · l⁻¹	NH_4^+			1,1	1,1
KNO_3	202	»	K^+	2,0	1,65		3,65
$(NH_4)_2SO_4$	72,5	»	Ca^{2+}	4,2			4,2
$MgSO_4$, 7 H_2O	270	»	Mg^{2+}			2,2	2,2
HK_2PO_4	192	»					
H_2KPO_4	150	»					
$Ca(NO_3)_2$	345	»					
Oligo-éléments :							
$MnSO_4$, 1 H_2O	0,616	mg · l⁻¹					
$ZnSO_4$, 7 H_2O	0,882	»					
H_3BO_3	0,562	»					
$CuSO_4$, 5 H_2O	0,196	»					
$MoO_4(NH_4)_2$	0,10	»	T	6,2	1,65	3,3	11,15

La solution est complétée par 0,1 ml · l⁻¹ de solution aqueuse du complexe ferrique du sel sodique de l'acide diéthylène triamine pentacétique contenant 2 mg · l⁻¹ de Fe.

L'ajustement du pH est fait par HCl ou NaOH à 6,2 ; l'eau utilisée pour la confection de la solution est de l'eau bipermutée.

Les mesures sont effectuées dans une chambre distincte de la chambre d'élevage, mais dans des conditions très voisines : l'éclairement est légèrement supérieur (30 000 lux).

B. — *Mise en place des racines, conditions et principe de la mesure*

Le système racinaire de la plante est introduit dans un erlenmeyer aménagé à col large (fig. 1).

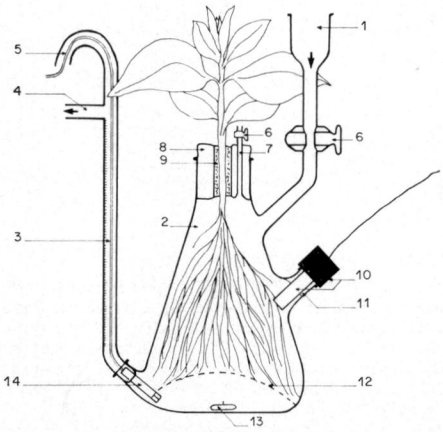


FIG. 1. — *Erlenmeyer aménagé en situation de fonctionnement*

1. Arrivée de la solution nutritive. — 2. Erlenmeyer aménagé. — 3. Tube gradué. — 4. Évacuation de la solution nutritive. — 5. Fils de la thermistance. — 6. Robinet. — 7. Tube de purge. — 8. Bouchon de caoutchouc. — 9. Mastic souple. — 10. Électrode à oxygène. — 11. Joint en caoutchouc. — 12. Grille de protection des racines. — 13. Barreau aimanté. — 14. Thermistance.

Ce récipient, dont les parois ont été noircies, est rempli de solution nutritive et purgé de toute bulle d'air.

La température, paramètre *a priori* important de la respiration, est maintenue constante à 20°C comme suit :

— d'une part, l'erlenmeyer est placé dans un bain thermostaté,

— d'autre part, le nécessaire renouvellement de la solution nutritive se réalise à partir d'un réservoir « intermédiaire » lui-même thermostaté.

La respiration des racines est appréciée d'après leur absorption d'oxygène. On suit les variations de la teneur en oxygène au moyen d'une électrode polarographique (à cathode en or et anode en argent) placée dans la solution. L'électrode est reliée à un amplificateur branché à un potentiomètre enregistreur (fig. 2).

Discussion du principe de la mesure.

Il existe, dans certains cas, une migration d'oxygène des parties aériennes vers les racines.

Cette migration semble suffisante pour assurer la croissance des racines en milieu anoxique chez les plantules de certains mésophytes (GREENWOOD, 1967 ; HEALY et ARMSTRONG, 1971). *Elle existe aussi chez les mésophytes plus âgés* (SOLDATENKOV et CHAO HSIEN-TUAN, 1961).

Si l'origine de l'oxygène paraît bien localisée dans les feuilles (SOLDATENKOV et CHAO HSIEN-TUAN, 1961 ; SOLDATENKOV et CHISKOVA, 1963), *aucun élément quantitatif n'a pu être fourni jusqu'à présent, l'oxygène étant probablement incorporé à des composés labiles* (VARTAPETIAN, 1973).

L'absorption d'oxygène à partir de la solution nutritive ne pourra donc être parfaitement identifiée à la respiration racinaire.

C. — *Circulation et renouvellement de la solution nutritive*

La solution sert de vecteur pour l'oxygène.

Pour se placer dans des conditions de teneurs en oxygène non limitantes, c'est-à-dire au-dessus du seuil de réponse de l'absorption d'oxygène à la diminution de la concentration (fig. 3), nous avons choisi la valeur de 8 p. 100 comme borne inférieure des teneurs.

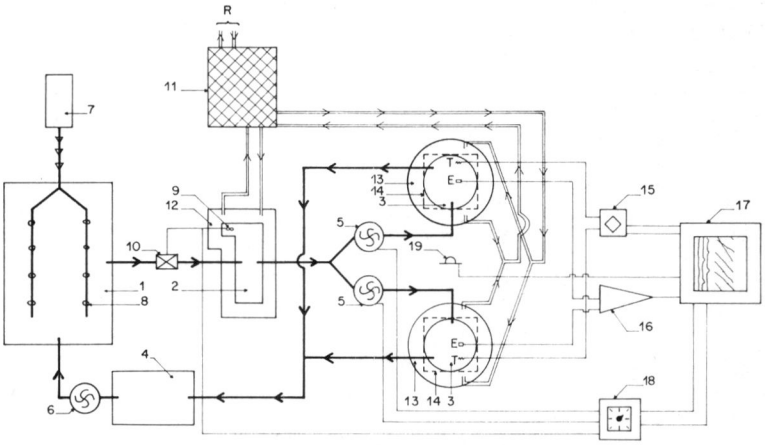


FIG. 2. — *Schéma général du dispositif expérimental*

1. Réservoir principal de solution nutritive. — 2. Réservoir intermédiaire thermostaté. — 3. Erlenmeyer aménagé. — 4. Réservoir de récupération de solution nutritive. — 5. Pompe. — 6. Pompe. — 7. Bouteille d'oxygène. — 8. Rampe de bullage. — 9. Contacteur à flotteur. — 10. Électrovanne. — 11. Ultrathermostat. — 12. Thermostatisation. — 13. Thermostatisation de l'erlenmeyer aménagé. — R. Refroidissement de l'ultrathermostat (eau du robinet). — 14. Agitateur magnétique. — T. Thermistance. — E. Électrode polarographique à oxygène. — 15. Pont de mesure pour les thermistances. — 16. Analyseur à oxygène. — 17. Potentiomètre enregistreur. — 18. Relais de temporisation. — 19. Pyranomètre.

Quand cette valeur est atteinte, le potentiomètre 17 (fig. 2) déclenche la mise en route de la pompe 5 assurant le renouvellement de la solution appauvrie par de la solution oxygénée du réservoir intermédiaire 3. La durée du renouvellement est déterminée par le relais temporisé 18.

A l'arrêt de la pompe, le niveau de la solution dans le réservoir intermédiaire est rétabli à partir de la solution contenue dans le réservoir principal 1, par l'ouverture de l'électrovanne 10, commandée par le contacteur à flotteur 9.

La solution appauvrie est récupérée dans le réservoir 4. Toutes les douze heures environ, elle est remontée dans le réservoir principal et réoxygénée.

D. — *Représentativité de la mesure*

La solution n'étant pas stérile, la disparition de l'oxygène constatée, peut provenir en partie de la respiration de micro-organismes. En outre, l'électrode elle-même absorbe de l'oxygène.

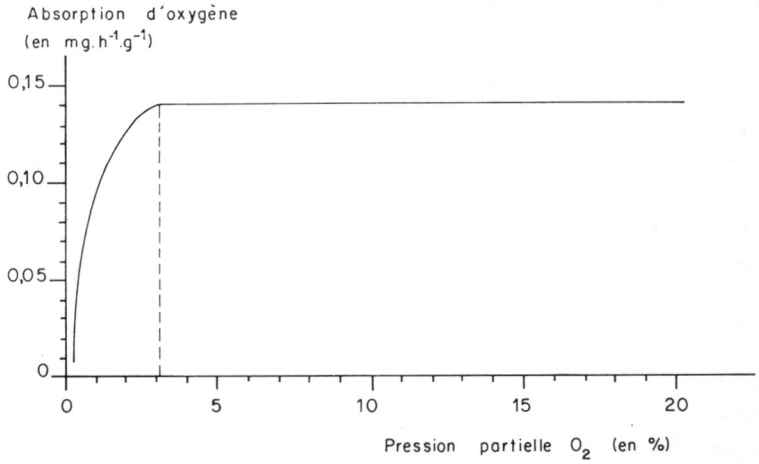


FIG. 3. — *Variation de l'absorption d'oxygène en fonction de la teneur en oxygène du milieu*

Pour tenir compte de cette consommation parasite, on effectue un « à blanc » sur la solution, en absence de racines. L'absorption observée provient alors uniquement des micro-organismes et du fonctionnement de l'électrode. La valeur obtenue est soustraite de l'estimation en présence de racines. Elle représente en moyenne 2,5 p. 100 de la consommation globale.

Cependant, il est certain qu'aux racines est associé un cortège microbien qui leur est étroitement lié et dont l'activité respiratoire n'est pas déduite dans la correction précédente. On peut l'estimer (KRASIL'NIKOV, 1958 ; GUILLAUMIN) à 2 p. 100 de l'absorption due aux racines. Si l'action directe du cortège microbien sur le bilan respiratoire semble ainsi tout à fait négligeable, nous sommes cependant incapables d'apprécier l'importance des modifications que la présence des micro-organismes associés peut introduire dans le fonctionnement des racines.

Il faut ainsi attribuer les résultats obtenus aux racines dans un certain contexte d'association microbienne.

E. — *Expression des résultats*

La mesure s'effectuant sur l'ensemble d'un système racinaire en croissance, il est nécessaire d'exprimer les résultats par des grandeurs tenant compte de cette évolution ; l'unité adoptée est le milligramme d'oxygène absorbé par heure et par gramme de poids frais, pour des raisons d'homogénéité avec le mode d'expression adopté antérieurement par différents auteurs.

Le poids frais des racines est déterminé, de manière non destructive, toutes les quarante heures à partir du volume racinaire mesuré par poussée d'Archimède. Ensuite, on utilise la relation suivante établie en mesurant le volume V et le poids frais P (de façon destructive) sur un grand nombre de plantes (mises hors expérience) : $P = k\,V$.

Le coefficient de proportionnalité k, empiriquement déterminé entre les deux valeurs P et V, intègre à la fois la densité des racines (voisine de 1) et la correction d'égouttage qui est réalisée de façon plus satisfaisante lors de la détermination du poids frais que lors de celle du volume.

On admet par ailleurs, pour l'estimation de P à chaque instant, que la croissance est constante dans l'intervalle des contrôles de V.

L'erreur commise sur la mesure résulte :

— d'une part de l'erreur sur l'absorption globale : $\pm$ 7 p. 100,

— d'autre part, de l'erreur sur le poids frais : $\pm$ 3 p. 100.

L'erreur relative totale $\pm$ 10 p. 100 est surtout imputable à la mesure de l'absorption globale.

III. — RÉSULTATS

Les résultats généraux, relatifs aux diverses expériences sont donnés au tableau 2.

A. — *Variation nycthémérale de l'absorption d'oxygène*

Un exemple est donné en figure 4.

Après la mise en place de la plante, l'absorption d'oxygène varie fortement ; ceci correspond probablement à une phase d'adaptation des racines consécutive à la transplantation.

Ensuite on observe une variation rythmique de l'absorption calquée sur la succession des périodes d'éclairement et d'obscurité ; les petites fluctuations observées autour du tracé moyen semblent avoir un caractère aléatoire.

La courbe d'évolution type établie à partir des moyennes mobiles calculées sur 7 essais montre (fig. 5) :

— en phase diurne, une augmentation rapide, progressivement atténuée, de l'absorption d'oxygène dans les quatre premières heures d'éclairement; cette augmentation représente *in fine*, environ 50 p. 100 de la valeur initiale ; la valeur atteinte se maintient durant un peu plus d'une heure puis subit un léger fléchissement suivi d'une stabilisation durant la fin de la phase diurne ;

— en phase nocturne, l'évolution est pratiquement inverse : une diminution d'abord rapide, s'atténuant progressivement avec tendance à l'établissement d'un palier d'absorption.

TABLEAU 2

Résultats généraux relatifs aux diverses expériences

		Obscurité		Lumière		Obscurité									
		1re période	2e période	1re période	2e période	1re période	2e période	3e période	4e période	5e période	6e période	7e période	8e période	9e période	10e période
Normal (7 plantes)	Moyenne.....	0,186	0,152	0,193	0,218	0,176	0,150								
	Intervalle à 5 p. 100 .	0,031	0,037	0,039	0,031	0,017	0,012								
Ablation des feuilles (4 plantes)	Moyenne.....	0,183	0,151	0,199	0,144	0,081	0,072								
	Intervalle à 5 p. 100 .	0,038	0,036	0,045	0,025	0,022	0,018								
Obscurité prolongée (3 plantes)	Moyenne.....	0,190	0,166	0,208	0,245	0,196	0,168	0,158	0,090	0,087	0,083	0,082	0,081	0,081	0,078
	Intervalle à 5 p. 100 .	0,073	0,070	0,083	0,078	0,077	0,062	0,020	0,032	0,021	0,020	0,017	0 015	0,012	0,010

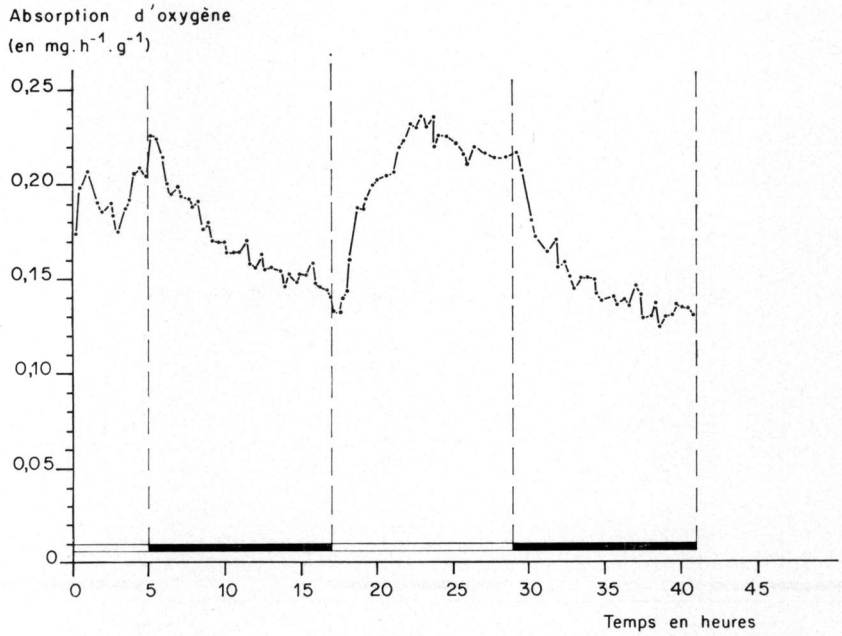


FIG. 4. — *Variations de l'absorption d'oxygène au cours du temps, pour une plante* (courbe expérimentale)

période de lumière

période d'obscurité

B. — *Effet de l'ablation des feuilles* (fig. 5)

Si, au milieu de la journée, on coupe toutes les feuilles de la plante, en conservant toutefois le bourgeon apical, l'absorption d'oxygène par les racines diminue fortement et instantanément (fig. 5). La variation est de 50 p. 100 en deux heures.

L'évolution se poursuit en s'amenuisant, sans action marquée du rythme d'éclairement. Un palier semble se dessiner huit heures après l'ablation ; le niveau atteint représente 43 p. 100 de l'absorption de la plante intacte en fin de nuit.

C. — *Effet de l'obscurité prolongée* (fig. 5)

Si on prolonge l'obscurité au-delà de la durée normale adoptée, on observe, peu après l'heure habituelle d'éclairement, un effondrement brutal de la « respiration racinaire » dont l'intensité est réduite de près de la moitié en cinq à six heures. Elle continue à décroître très lentement par la suite ; vingt-quatre heures après le début de l'obscurité prolongée on atteint les valeurs moyennes d'absorption observées pendant la nuit suivant l'ablation foliaire (tabl. 2).

Par la suite, la diminution de l'absorption se stabilise à 2 p. 100 environ jusqu'à la fin de l'expérience, soixante heures après la mise à l'obscurité.

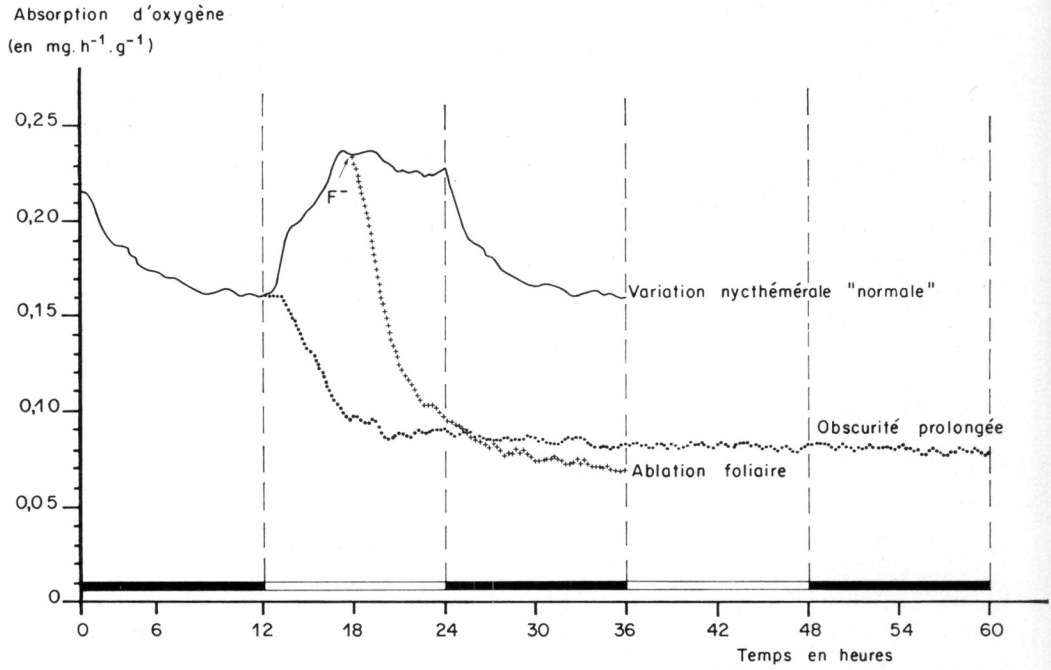


FIG. 5. — *Courbes types, établies à partir de moyennes mobiles, des variations de l'absorption d'oxygène au cours du temps, suivant les traitements*

——— plante entière et photopériode de douze heures (7 essais)
+++++++ ablation des feuilles (F^-) dix-huit heures après le début de l'expérience (4 essais)
..... mise en obscurité continue avec quarante heures d'adaptation avec une photopériode de douze heures (3 essais)

IV. — DISCUSSION

Notons tout d'abord que les variations nycthémérales de l'absorption d'oxygène par les racines chez le Tournesol sont tout à fait semblables à celles observées sur d'autres espèces.

A partir de cette observation, on peut émettre deux hypothèses :

1° le rythme d'absorption d'oxygène est dû aux variations de l'approvisionnement en métabolites (rythme exogène). Cette hypothèse semble bien confirmée par la chute brutale de l'absorption après une ablation foliaire décalée par rapport au rythme d'éclairement ;

2° le rythme observé est un rythme endogène acquis et propre aux racines. Bien qu'un tel rythme n'apparaisse pas en obscurité prolongée, on ne peut conclure à sa non existence ; il est possible qu'il ne puisse pas s'exprimer dans cette condition expérimentale pour des raisons, non pas d'organisation temporelle, mais par exemple d'ordre trophique (BAILLAUD).

La discontinuité observée en début de nuit prolongée peut correspondre à un rythme endogène qui ne serait pas localisé dans les racines puisque la variation va en sens inverse de celle observée en conditions normales. Ainsi, en admettant avec

BUNNING (1964) et WILKINS (1969) un rythme circadien au niveau des parties aériennes avec augmentation durant l'équivalent de la phase diurne, on peut assez bien expliquer le phénomène observé : l'augmentation de la respiration foliaire, selon le rythme qui lui est propre, entraîne, en l'absence d'assimilation chlorophylienne, la chute des transferts vers les racines, donc un ralentissement de leur absorption de O_2; ensuite, comme on retrouve des valeurs d'absorption voisines de celles obtenues après ablation foliaire, on peut penser que l'absorption résulte du « métabolisme basal » des racines ; aucun transfert de métabolites n'existerait alors entre les parties aériennes et les racines. L'effet présumé du rythme endogène de la respiration des parties épigées ne se ferait plus sentir sur le fonctionnement racinaire.

Plusieurs éléments peuvent expliquer la dépendance des racines vis-à-vis des feuilles ; le fonctionnement racinaire conduit principalement à la consommation d'énergie pour diverses fonctions, énergie fournie (en conditions aérobies) par le cycle de Krebs et la chaîne des oxydations terminales. Les glucides fournis par la photosynthèse constituent le point de départ de cette chaîne catabolique. Il faut remarquer, en outre, que d'autres éléments synthétisés par les feuilles, des vitamines par exemple, concourent au fonctionnement du catabolisme racinaire (KAZARJAN, 1969). Enfin, on peut envisager que l'accélération diurne de l'absorption d'oxygène provienne de la diminution du flux d'acide β-indolylacétique migrant vers les racines (HUCK *et al.*, 1962) ; cependant, l'action de cette auxine en tant qu'inhibiteur de la respiration de même que son devenir dans la plante à la lumière sont des phénomènes encore très controversés (GOLDSMITH, 1969 ; THIMANN, 1969).

V. — CONCLUSION

Ce travail a permis de confirmer l'existence d'un rythme nycthéméral de l'absorption d'oxygène par les racines.

Ce rythme semble être commandé en priorité par les flux trophiques vers les racines, en relation avec le rythme d'éclairement du feuillage. Ceci est confirmé essentiellement par nos essais d'ablation foliaire.

L'existence de discontinuité dans la variation de l'absorption en obscurité prolongée, conduit cependant à supposer l'existence d'un rythme comportant une composante endogène, ayant une localisation dans les feuilles et une répercussion au niveau des racines. Ce dernier rythme ne serait perceptible que pour des niveaux respiratoires suffisamment élevés, c'est-à-dire lorsque le substrat métabolique n'est pas limitant.

Ces résultats montrent que, si le fonctionnement des racines dépend directement de leur environnement physique (KRAMER, 1969), il est aussi indirectement tributaire des facteurs de l'environnement des parties épigées comme nous le montrons ici pour la lumière.

Reçu pour publication en septembre 1976.

SUMMARY

EFFECT OF IRRADIANCE OF THE LEAVES ON ROOT RESPIRATION IN SUNFLOWER

This paper deals with the effect of irradiance on root respiration as studied on the shoots of sunflower.

This respiration has been taken as a mesure of the root metabolic activity. The respiration is measured by the quantity of oxygen which is absorbed from the nutrient solution on the condition where the oxygen supply is not limiting.

A rythmic variation in the absorption in phase with the light and dark periods was observed. Defoliation and a long dark period lead to a more or less rapid but important drop in the oxygen absorption.

It is concluded that root activity is primarily determined by the nutrient fluxes connected with the light periods. However the absence of an endogenous rythm cannot be proved.

ZUSAMMENFASSUNG

ZUSAMMENHANG VON BLATTBELICHTUNG MIT SAUERSTOFFAUFNAHME DURCH DIE WURZEL VON SONNENBLUME (*HELIANTHUS ANNUUS* L.)

Die Untersuchung betrifft die Wirkung der Belichtung von den oberirdischen Teilen der Sonnenblume auf die Wurzelatmung als Spiegelbild ihrer Stoffwechseltätigkeit.

Die Atmung ist von der Aufnahme des Nährlösungsauerstoffs an in Gegenwart von Sauerstoffgehalten geschätzt, welche die Wurzeltätigkeit nicht begrenzen.

Eine rhythmische Schwankung der Aufnahme, die der Aufeinanderfolge der Belichtungs- und Dunkelzeitabschnitten entspricht, wurde festgestellt. Die Blattabnahme und der verlängerte Dunkelzeitabschnitt führen zu einem wichtigen, aber mehr oder weniger raschen Abfall der Sauerstoffaufnahme.

Daraus wird geschlossen dass die Wurzeltätigkeit im wesentlichen von dem mit den Belichtungsrhythmen verbundenen Ernährungsströmen abhängt. Dennoch kann das Nichtsein eines endogenen Rhythmus nicht vollkommen dargelegt sein.

РЕЗЮМЕ

Связь между освещением листьев и поглощением кислорода корнями подсолнечника (*Helianthus Annuus* L.).

Ж. С. ФРОССАР.

В данной работе изучается действие освещения обезлиственных частей подсолнечника на дыхание корней, рассматривающееся как отражение их метаболической активности.

Дыхание определялось по количеству кислорода, поглощенного корнями из питательного раствора, в условиях содержаний кислорода, не ограничивающих корневую активность.

Наблюдавшееся ритмическое изменение поглощения соответствовало чередованию времен освещения и затемнения. Отсутствие листьев и длительная темнота приводили к заметному, и более или менее быстрому ослаблению поглощения кислорода. Из этого выводится заключение, что корневая активность приводится в действие трофическими потоками, связанными с ритмами освещения. Однако нет возможности доказать с точностью, что не существует еще и какой-то эндогенный ритм.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAILLAUD L. Communication personnelle. Laboratoire de Biologie végétale de la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand.

BUNNING E., 1964. The Physiological clock : endodiurnal oscillations as the principle of many physiological time measuring process. 4-19, Springer-Verlag, Berlin.

GUILLAUMIN J. J. Communication personnelle. Station de Pathologie végétale, C.R.A. Clermont-Ferrand.

GOLDSMITH M. E., 1969. *Transport of plant growth regulators : effect of light.* In Physiology of Plant Growth and Development, p. 148, Wilkins M. B. éd., Mac Graw-Hill, London.

GREENWOOD D. V., 1967. Studies on the transport of oxygen through the stems and roots of vegetable seedlings. *New phytol.*, **66**, 337-347.

HARRIS D. G., VAN BAVEL C. H. M., 1957. Root respiration of Tobacco, Corn and Cotton plants. *Agron. J.*, **49**, 182-184.

HEALY M. T., ARMSTRONG W., 1972. The effectiveness of internal oxygen transport in a mesophyte (*Pisum sativum* L.). *Planta*, **103**, 4, 302-309.

HUCK M. G., HAGEMAN R. H., MANSON J. B., 1962. Diurnal variation in root respiration. *Plant Physiol.*, **37**, 371-375.

KAZARJAN V. O., 1969. Le vieillissement des plantes supérieures : corrélation fonctionnelle racino-foliaire comme base de l'intégrité et du développement des plantes supérieures. 31-86, éd. Nauka,. Moscou.

KRAMER P. J., 1969. *Plant and soil water relationships.* Environmental factors affecting root growth 136-145, Mc Graw-Hill, London.

KRASIL'NIKOV N. A., 1958. *Soil microorganisms and higher plants.* Interaction between soil microorganisms and plants : effect of plant on the soil microflora ; effect of soil microorganisms on plants, 265-276, 313-348. *Acad. Sc. U.R.S.S.*, Moscou.

MAERTENS C., 1971. Étude expérimentale de l'alimentation minérale et hydrique du Maïs. Capacité d'absorption des parties basales et apicales des racines de Zea maïs. *C. R. Acad. Sc. Paris*, **273**, 730-732.

MORIZET J., ROBELIN M., 1975. Mesure de la poussée radiculaire ; corrections des données expérimentales et confrontation des résultats avec la théorie osmotique. *Ann. agron.*, **26** (2), 125-137.

OSMAN A. M., 1971. Root respiration of wheat plants as influenced by age, temperature and irradiation of shoots. *Photosynthetica*, **5** (2), 125-137.

PÉRIGAUD Simone, 1967. Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur la croissance et la nutrition globale de la plante. *Ann. agron.*, **18** (5), 485-506.

SOLDATENKOV S. V., CHAO HSIEN-TUAN, 1961. The role of bean and corn leaves in respiration of oxygen deprived roots. *Fiziol. Rasten*, **8** (4), 385-394.

SOLDATENKOV S. V., CHIRKOVA T. V., 1963. The role of leaves in the respiration of oxygen-deprived roots. *Fiziol. Rasten*, **10** (5), 535-543.

THIMANN K. V., 1969. The auxins : destruction of indole-acetic acid. In *Physiology of plant growth and development* 28-29. Wilkins M. B. éd., Mac Graw-Hill, London.

VARTAPETIAN B. B., 1973. Aeration of roots in relation to molecular oxygen transport in plants. UNESCO. Plant response to climatic factors. *Proc. Uppsala Symp.*, 1970, Ecology and conservation, **5**, 259-265,

WILKINS M. B., 1969. Circadian rhythms in plants : control of circadian oscillating systems by environmental factors, in *Physiology of plant growth and development*, 652-660, Wilkins M.B. éd., Mac graw-Hill, London.

Ann. agron., 1976, **27** (4), 447-463.

HISTOIRE HYDRIQUE ET STABILITÉ STRUCTURALE DE LA TERRE

J. BOIFFIN

avec la collaboration technique de Anne EYRAL, Danielle GODARD [1] et C. RENAUDIN [1]

Chaire d'Agriculture,
Institut national agronomique Paris-Grignon,
75231 Paris

RÉSUMÉ

En soumettant au laboratoire des échantillons de terre à des histoires hydriques simplifiées, on a observé que leur stabilité structurale varie en relation avec une modification de la mouillabilité des constituants organiques.

L'obtention de valeurs basses est rapide si la terre séjourne en présence d'un excès d'eau même faible. L'obtention de valeurs élevées exige un séjour en conditions sèches mais la présence d'une quantité minimum d'eau est nécessaire.

La température modifie l'amplitude des évolutions obtenues en un temps donné. Diverses relations sont dégagées entre la stabilité structurale et les caractéristiques de l'histoire hydrique de la terre. Les conséquences agronomiques et méthodologiques sont abordées.

INTRODUCTION

La prévision des comportements du sol s'appuie sur la connaissance des propriétés mécaniques et structurales des matériaux qui constituent ses horizons. Des difficultés particulières surviennent si ces propriétés varient au cours du temps ou si leur évaluation dépend des conditions de récolte et de traitement des échantillons. Ainsi, pour apprécier les risques de battance en sol limoneux, on est conduit à envisager la stabilité structurale de la terre, c'est-à-dire la résistance qu'elle oppose à la dégradation de son état structural par l'eau.

Or, de nombreux auteurs ont signalé des variations saisonnières ou interannuelles

[1] Étudiants à l'I.N.A. Paris-Grignon ; D.A.A. Sciences et Techniques des Productions végétales (1972-1973).

au champ de cette propriété, en relation avec le climat (HÉNIN, 1938 ; HÉNIN et TURC, 1949 ; COMBEAU et QUANTIN, 1963 ; BACHELIER, 1964 ; MONNIER, 1965 ; SEBILLOTTE, 1968). Les fortes valeurs sont enregistrées au cours ou à la suite de périodes sèches, les minima en périodes humides.

De plus, un travail de laboratoire (MONNIER et KONAN, 1968) a montré l'influence sur la stabilité structurale, des conditions de séchage des échantillons : outre l'humidité lors du prélèvement (facteur déjà signalé par PÉRIGAUD, 1963), la température en cours de séchage intervient et accroît les résultats obtenus si elle s'élève au-delà de 30°C.

Tous ces travaux apprécient la stabilité structurale grâce au test d'analyse d'agrégats proposé par HÉNIN et MONNIER (1956). Les fluctuations les plus marquées concernent le taux d'agrégats après pré-traitement benzène, suggérant des modifications de mouillabilité des constituants organiques.

On a cherché à mettre en évidence les modalités d'établissement des valeurs fortes et faibles de stabilité structurale, en soumettant la terre à diverses histoires hydriques simples, réalisées en laboratoire.

Ces traitements visent à dissocier les influences respectives de l'humidité de la terre, des variations de cette humidité, et de la température.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. — *Sols étudiés* (tabl. 1)

Compte tenu de l'importance des constituants organiques et de leur état dans le phénomène étudié, on doit s'attendre à des différences de réactivité à l'histoire hydrique selon la provenance des terres. La gamme d'échantillons retenus, au sein de laquelle varient la teneur, l'origine et les modalités d'association à la fraction minérale des matières organiques, permet la mise en évidence de cette interaction. Mais l'analyse de celle-ci n'étant pas le but recherché, l'étude détaillée des modalités de variation de la stabilité structurale ne portera que sur la terre n° 1.

Cette dernière est choisie en raison de sa composition très pauvre en argile, qui accroît l'incidence, sur la stabilité structurale, des modifications concernant ses constituants organiques.

2. — *Modèles d'histoire hydrique*

a) *Humidité de la terre constante* (terre contenue en boîtes étanches).

Les facteurs de variation étudiés sont alors :

— *la teneur en eau de la terre.* On a retenu des teneurs :

- voisines de la capacité au champ,
- supérieures à celle-ci,
- nettement inférieures (5 à 10 p. 100),
- proches de 0 p. 100 ;
  - dans les deux premiers cas, on attend une baisse de la stabilité structurale,
  - dans les deux derniers, une hausse par rapport à la valeur de référence du témoin non traité (terre de même origine ayant séché à l'air libre à 15-20°C et séjourné plusieurs mois à sec).

— *la température régnant au cours du séjour.*

Les travaux de MONNIER (1965) et KONAN (1968), montrent son influence. On testera en phase humide des températures de 5 et 20°C, en phase sèche des températures de 20 et 80°C.

TABLEAU I

Caractéristiques des terres étudiées

N° de la terre	Origine et observations	Granulométrie de la terre fine (fraction minérale) en p. 100 de terre sèche					Calcaire	C ‰ (Anne)	N ‰ (Kjeldahl)	Humidité à la capacité au champ (%)
		0-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2 000 μ				
1	Montluel (Ain). Couche labourée. Prairie temporaire de 3 ans. Sol très battant en rotation céréalière, très amélioré par la prairie.	9,8	24,7	48,8	15,1	1,6	0	11,6	1,20	18,5
2	42 parcelles Versailles, traitement témoin horizon de surface. Parcelle nue maintenue depuis 30 ans sans apport organique. Sol battant.	18,5	23,8	36,4	18,1	3,2	0	7,0	1,18	23,0
3	42 parcelles Versailles, traitement fumier horizon de surface. Parcelle nue recevant depuis 30 ans 100 t/ha/an de fumier. Sol assez battant mais beaucoup moins que 2.						0	24,4	2,67	29,0
4	Horizon B Versailles. Horizon d'accumulation d'un sol de limon.	32,6	24,0	42,2	0,8	0,3	0	2,9	0,83	27,0
5	Horizon B légèrement enrichi en acides humiques extraits du purin de cheval.						0	3,5	1,14	
6	Horizon B fortement enrichi en acides humiques extraits du purin de cheval.						0	10,5	2,14	

b) *Humidité de la terre variable.*

Deux séries de manipulations visent à mettre en évidence les influences respectives de l'*amplitude* et de la *vitesse* de la variation d'humidité de la terre :

— la terre, préalablement saturée et séjournant en présence d'eau libre pendant un temps contrôlé, est ensuite soumise à une dessiccation normale à l'air libre à 20°C. Cette dessiccation est interrompue en temps voulu pour une partie de l'échantillon qui est placée en boîte fermée *à l'étuve (80°C)*. On réalise ainsi divers trajets hydriques de durée chronologique constante : l'humidité à l'entrée en étuve est choisie, l'humidité à la sortie de l'étuve varie également grâce à une fermeture plus ou moins ajustée des boîtes. Dans la plupart des cas, l'interruption du séjour en étuve intervient avant que la dessiccation ne soit totale ;

— la terre, préalablement saturée et séjournant à saturation pendant un temps contrôlé, se dessèche à 20°C, mais est soumise à divers systèmes de ventilation. On contrôle par pesées régulières la vitesse de dessiccation.

3. — *Manipulation et préparation des échantillons, réalisation des tests*

Les humectations ont été réalisées avec précaution, soit par capillarité, soit par vaporisation, en vue de restreindre leur effet destructif direct. Elles ont été appliquées à des échantillons passés au tamis de maille carrée de 2 mm.

Quel que soit le traitement expérimental appliqué, le test final d'appréciation de la stabilité structurale est réalisé à partir de la terre sèche. Dans tous les cas s'interpose donc une phase de séchage à l'air entre le traitement expérimental et le test qui le sanctionne. Tenant compte des conclusions de MONNIER et KONAN, on a veillé à ce que cette phase se déroule dans tous les cas à une température voisine de 18°C et réduit, autant que possible, les délais de stockage, qui n'excèdent jamais 5 jours. On peut alors admettre que les variations entre les résultats sont bien, pour l'essentiel, imputables aux interactions terres × traitements expérimentaux, et non à des interactions parasites terres × modalités de séchage final. Celles-ci ne pourraient être négligées si la température de séchage finale était plus élevée, ou si les conditions de ce séchage et du stockage avant analyse étaient hétérogènes.

Une fois sec, l'échantillon traité est de nouveau passé à 2 mm, en vue de pratiquer le test d'analyse d'agrégats proposé par HÉNIN et MONNIER (1956), dont la procédure a été mise au point par FÉODOROFF (1960). Une seule modification a été apportée à la méthode standard. L'analyse d'agrégats est pratiquée non pas sur toute la terre fine ayant subi le traitement expérimental, mais sur les seuls agrégats compris entre 200 et 2 000 μ. Cette variante, à laquelle ont recouru de nombreux travaux, confère au test une plus grande sensibilité et restreint l'incidence d'hétérogénéités éventuelles dans la vigueur du forçage à 2 mm qui interfère sur la quantité de terre fine (< 200 μ) fabriquée au cours de cette opération de tamisage.

Pour l'appréciation de la stabilité, on a retenu les taux d'agrégats stables, et surtout le taux d'agrégats stables après pré-traitement benzène (AgB). On cherche ainsi à mieux faire apparaître les variations de stabilité liées aux modifications des constituants organiques de la terre. Tout résultat mentionné est la moyenne de 3 répétitions.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1. — *Évolution de la stabilité structurale de la terre en conditions humides*

a) *Au voisinage de la capacité au champ.*

Les figures 1 (AgB) et 2 (AgA) montrent l'évolution de la stabilité structurale de 4 terres séjournant à l'humidité à la capacité au champ. Après une période initiale au cours de laquelle les variations sont très irrégulières, on observe une tendance à la baisse du taux d'agrégats-benzène pour tous les matériaux présentant au départ une résistance à l'agression par l'eau. La tendance est beaucoup moins nette pour le taux d'agrégats-alcool. Mais l'évolution constatée est lente quelle que soit la température,

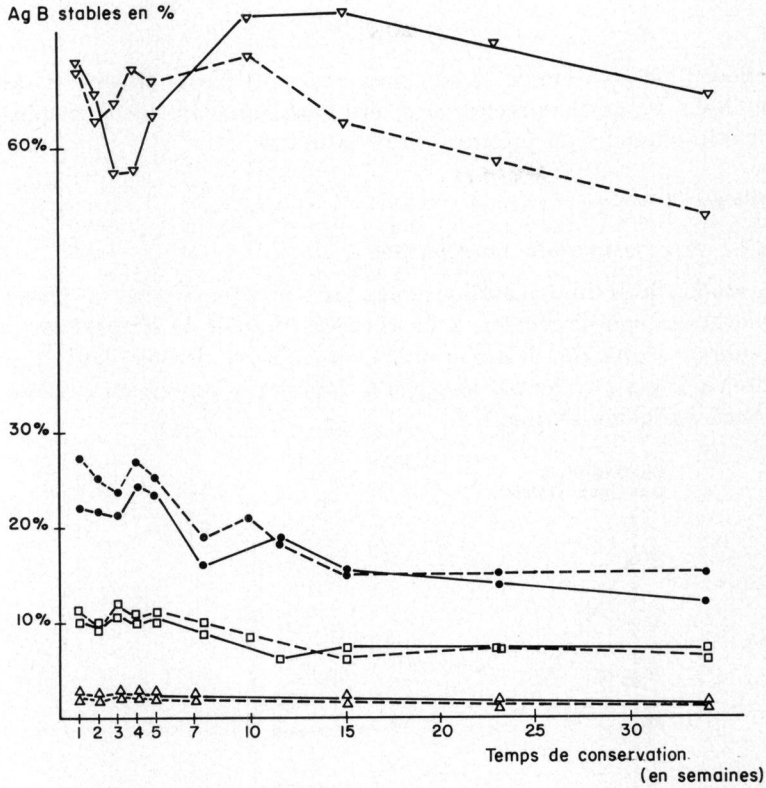


FIG. 1. — *Variation du taux d'agrégats benzène* (séjour de la terre à la capacité au champ)

Terre n° 1 ● (Montluel)
n° 3 □ (42 P.)
n° 4 △ (H.B.)
n° 6 ▽ (H.B. + A.H.)

t de conservation —— 18-20°C
– – – 4-5 °C

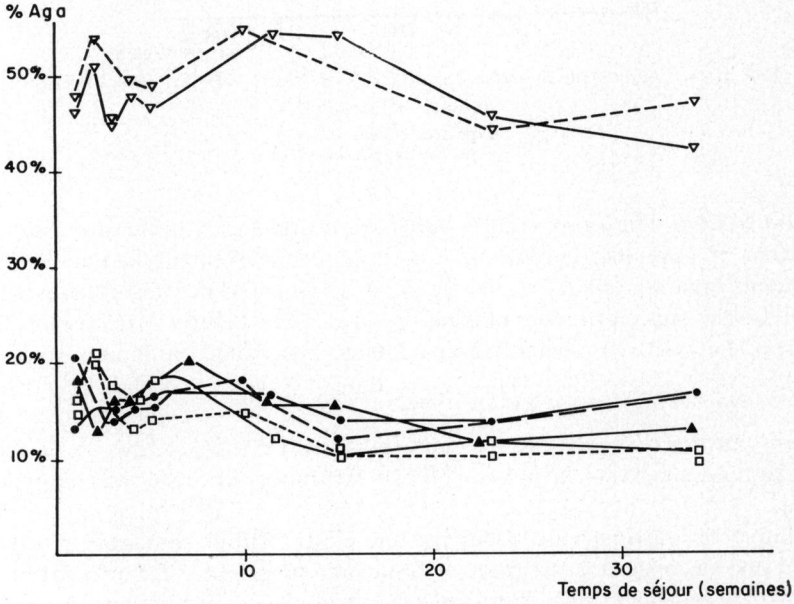


FIG. 2. — *Variation du taux d'agrégats alcool* (même légende que figure 1)

et une période d'observation de 34 semaines ne permet pas la mise en évidence d'un minimum. Nous avons alors recherché si des variations plus fortes et plus rapides pouvaient être obtenues en présence d'eau saturante.

b) *En présence d'eau saturante.*

1° *Effet d'une saturation intermittente.*

On a soumis de petits échantillons de la terre n° 1 (environ 10 g) placés sur une toile tendue et drainant librement, à une succession rapide de saturations (par nébulisation) alternant avec des dessiccations. L'ensemble se déroule dans l'atmosphère du laboratoire. Il y a 4 cycles par jour. On interrompt le traitement expérimental au bout de délais variables (cf. figure 3).

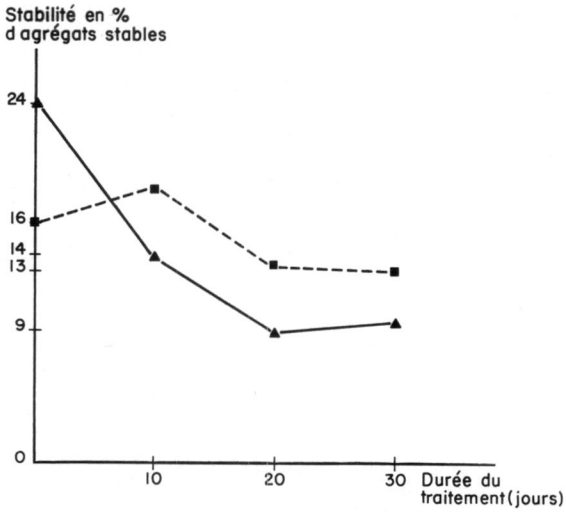


FIG. 3. — *Évolution de la stabilité structurale sous l'effet de saturations fréquentes*

Terre n° 1 (Montluel)

■ prétraitement alcool
▲ prétraitement benzène

C'est le taux d'agrégats stables après pré-traitement benzène qui réagit le plus au traitement appliqué, confirmant que c'est essentiellement la mouillabilité des constituants organiques qui est affectée. On observe une chute importante de la stabilité structurale, plus marquée et plus rapide que lorsque la terre se trouve à la capacité au champ. Le taux d'agrégats-benzène atteint une valeur minimum.

2° *Séjour continu en conditions d'excès d'eau.*

Dans une deuxième expérience, dont les modalités sont décrites par le tableau 2, on a maintenu constante la présence d'eau saturante. Les résultats figurent sur la figure 4.

L'humectation sous vide aboutit à une chute brutale de stabilité structurale, suivie d'une décroissance progressive beaucoup plus lente. L'humectation à l'air libre entraîne également une chute sensible, mais celle-ci semble retardée par rapport

TABLEAU 2

Conditions de réalisation d'un séjour avec excès d'eau

Série	Modalité d'humectation	Humidité obtenue (% de T.S.)	Stabilité initiale des agrégats de la série (AgB %)	Température d'humectation et de séjour
α	sous vide (1)	50 à 60	23	
β	sous vide (2)	23	18	18-20°C
γ	air libre (1)	40	18	

(1) et (2) = support interposé entre la terre et le plan d'eau :
(1) = coton hydrophile.
(2) = plaque de porcelaine pour pF_3.

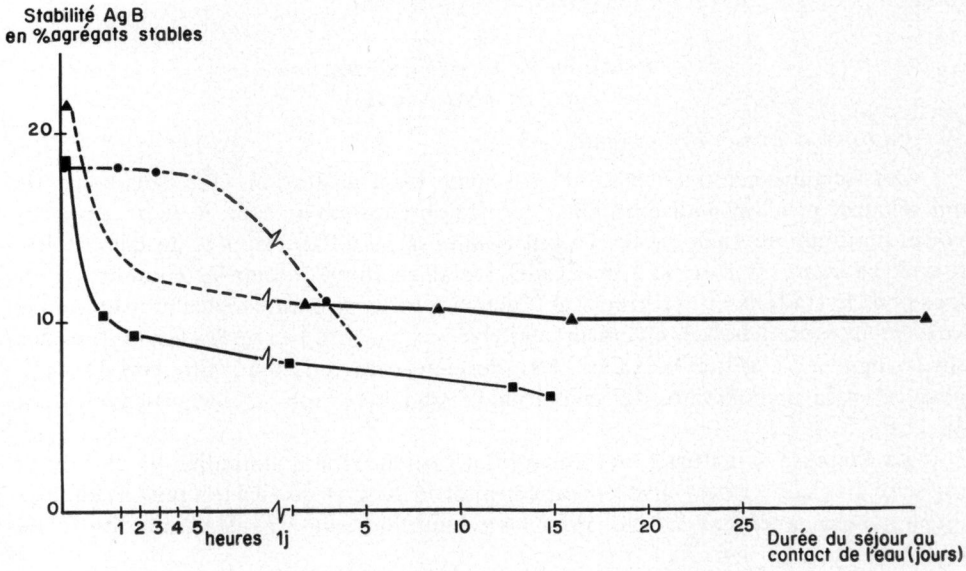


FIG. 4. — *Variation du taux d'agrégats benzène*
(séjour de la terre en présence d'eau saturante)

Terre n° 1 (Montluel)

série α ▲ – – – ———
série β ■ ———
série γ ● — — — · — —

à l'humectation sous vide. La quantité d'eau en excès semble peu intervenir dans le résultat final dans la mesure où, au bout de 15 jours, la baisse des taux d'agrégats stables est très voisine (respectivement 13 et 12 p. 100) pour les séries α et β. Les résultats obtenus pour un séjour prolongé (série α) suggèrent que l'on atteint une valeur minimale. Celle-ci est proche de la limite déjà enregistrée précédemment (saturation intermittente) en conditions expérimentales différentes.

La présence d'eau saturante, même en faible quantité, est en définitive la condition nécessaire pour obtenir une chute sensible de la stabilité structurale. Des résultats obtenus au champ pour la terre n° 3 (BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976) confirment ce résultat. Il y a donc une certaine coïncidence entre l'évolution de la stabilité structurale et l'humectation des pores les plus grossiers et des faces externes des agrégats. On rapprochera cette observation du fait que la vitesse de pénétration de l'eau dans les pores les plus gros des agrégats est un des principaux facteurs d'obtention des conditions d'éclatement des agrégats terreux (CONCARET, 1976). Du reste il se confirme que l'évolution de la stabilité structurale est pour sa plus grande part imputable à un accroissement de mouillabilité de tout ou partie des constituants organiques de la terre. Elle conduit (à 20°C) à une stabilité minimum qui semble caractéristique de la terre.

Ces modifications sont en certaines conditions (humectation sous vide) presque instantanées, ce qui corrobore l'hypothèse d'un mécanisme physique avancée par MONNIER et KONAN (1968) et SEBILLOTTE (1968). Les variations de vitesse de l'évolution de la stabilité structurale pourraient être liées au caractère plus ou moins complet de l'imprégnation par l'eau de la porosité interne aux agrégats, l'air emprisonné lors de l'humectation jouant un rôle protecteur.

2. — *Évolution de la stabilité structurale en sortie de phase humide*

a) *Évolution à humidité constante.*

Des échantillons (terre n° 1) ont été humectés à saturation, état dans lequel ils ont séjourné pendant 90 heures. On a vérifié l'obtention d'un taux AgB (11,4 p. 100) voisin du minimum déjà décelé. Ils ont ensuite séché à l'atmosphère du laboratoire, le séchage étant interrompu à intervalles variables afin d'obtenir les humidités voulues pour le traitement expérimental. Celui-ci a consisté en un séjour plus ou moins long en boîtes étanches à température variable (20, 35, 80°). Les résultats sont reportés sur les figures 5 (AgB) et 6 (AgA). Cette dernière caractéristique varie peu. De nouveau, c'est la mouillabilité des constituants organiques qui semble principalement affectée.

La stabilité structurale des échantillons séjournant à humidité proche de la capacité au champ reste sensiblement constante à 20°C et décroît légèrement en deçà du minimum précédent à 80°C. Pour les échantillons séjournant à humidité faible (4 et 7 p. 100), on note :

— à 20°C, une lente remontée de stabilité (au bout d'un mois on retrouve le niveau du témoin ayant séjourné longtemps à sec, et rien n'indique que la remontée soit terminée) ;

— à 80°C, une stabilisation rapide et quasi totale, dans les conditions du test ;

— à 35°C, une élévation d'allure intermédiaire.

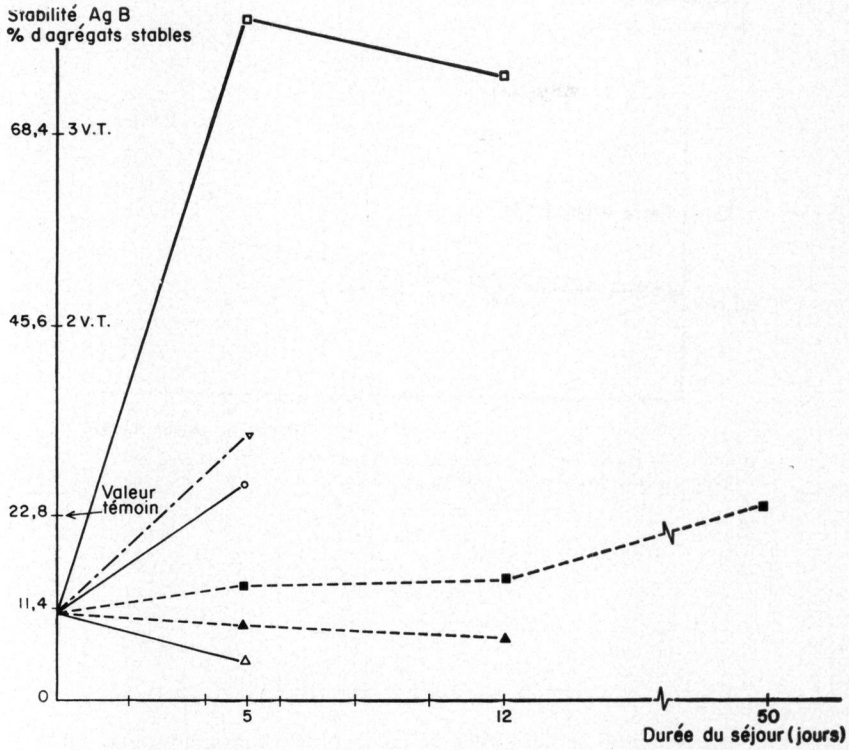


FIG. 5. — *Évolution de la stabilité structurale* (AgB) *de la terre n° 1 soumise à diverses histoires hydriques* (séjour à humidité constante)

V.T. : valeur témoin (terre non traitée ayant longtemps séjourné à sec)

Humidité (%)	Température (°C)		
	20	35	80
0			○
4	■		□
7		▽	
20	▲		△

L'échantillon sec placé à 80°C manifeste une élévation de stabilité, mais beaucoup plus faible qu'en présence d'une petite quantité d'eau au sein de la terre : l'eau apparaît donc bien comme le facteur actif principal de ces évolutions. On notera que ces résultats ne sont pas en contradiction avec ceux de MONNIER (1965) sur l'influence du chauffage des terres.

b) *Évolution en régime de dessiccation.*

1° *A température élevée (80°C).*

Des échantillons de la terre n° 1 (MONTLUEL) ont été humectés à saturation. Ils ont séjourné en présence d'eau libre pendant 90 heures à 20°C, afin d'atteindre la stabilité minimale.

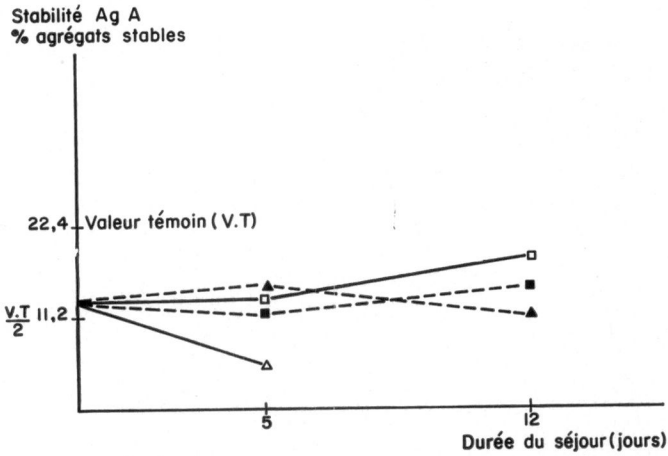


FIG. 6. — *Évolution de la stabilité structurale* (AgA) *de la terre n° 1 soumise à diverses histoires hydriques* (séjour à humidité constante)

Humidité (%)	Température (°C)	
	20	80
4	■	□
20	▲	△

On les a ensuite laissés se dessécher de façon plus ou moins poussée, puis placés en boîtes fermées, non étanches, elles-mêmes placées en étuve à 80°C, obtenant ainsi huit « trajets » (de I à VIII) en étuve, d'amplitude variable pour une durée chronologique constante (2 jours). Les humidités ont été contrôlées au début et à la fin du séjour en étuve. Les terres ont ensuite fini de sécher à l'air libre à 20°C et ont subi le test. Les résultats figurent dans le tableau 3 :

— lorsque les trajets hydriques en étuve partent d'une humidité faible (trajet V à VIII), obtient une très forte augmentation du taux d'agrégats-benzène, voisine de celle déjà enregistrée pour un séjour de la terre à 80°C et 4 p. 100 d'humidité, à l'exception du trajet n° VIII. Le résultat obtenu dans ce dernier cas confirme qu'en l'absence d'eau au sein de la terre les modifications de mouillabilité sont faibles ;

— pour les trajets I à IV les humidités de départ sont plus élevées et l'amplitude de variation de la teneur en eau est plus importante. Les résultats sont alors extrêmement variables mais on vérifie qu'un passage à faible humidité entraîne une diminution de la mouillabilité. En effet, le taux d'agrégats-benzène obtenu est très corrélé à l'amplitude du trajet hydrique en deçà de 10 p. 100 d'humidité [1] (fig. 7).

2° *A température ambiante.*

Des échantillons de la terre MONTLUEL ont été humectés à saturation et y ont séjourné respectivement 0, 1, 3, 70 heures. Chacun de ces lots a été soumis à 3 moda-

[1] Si h_s est l'humidité en sortie d'étuve, cette grandeur est de

$$10\text{-}h_s \text{ pour } h_s < 10$$
$$0 \quad \text{pour } h_s > 10.$$

TABLEAU 3

Valeurs indexées des taux d'agrégats-benzène après dessiccations partielles à 80°C

Terre n° 1 (Montluel).

Base 100 : taux d'agrégats-benzène du témoin non traité (22,8 p. 100)

Série n°	Trajet hydrique en étuve		AgB (valeur indexée)
	h_d : (humidité de départ en %)	h_s : (humidité à la sortie de l'étuve en %)	
I	23,0	16,1	25
II	23,2	7,7	110
III	15,0	4,9	180
IV	10,8	0,8	315
V	5,1	2,8	330
VI	6,9	2,9	355
VII	5,1	3,3	360
VIII	0,6	0,3	115

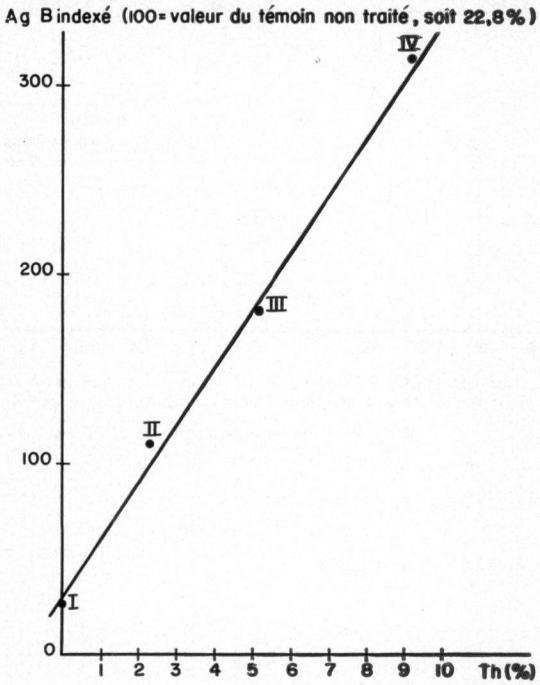


FIG. 7. — *Stabilité structurale après dessication partielle à 80°C, en fonction du trajet hydrique de la terre à moins de 10 p. 100 d'humidité*

$Th = 10 - h_s$ si $h_s < 10$

$Th = 0$ si $h_s > 10$

lités de séchage : séchage très lent en atmosphère confinée, séchage normal dans l'ambiance du laboratoire, séchage accéléré par ventilation. On a suivi régulièrement la perte de poids des échantillons en fonction du temps.

On a caractérisé l'histoire hydrique de chaque échantillon par le rapport entre :

— au numérateur, le temps nécessaire pour atteindre, à partir de la capacité au champ, un poids constant (humidité hygroscopique) ;

— au dénominateur, le temps de séjour en présence d'eau saturante (depuis la mise en saturation jusqu'à l'atteinte de la capacité au champ).

On constate une corrélation positive entre ce rapport et le taux d'agrégats stables AgB obtenu par test à l'issue des séchages (fig. 8). On constate également que les plus fortes stabilités obtenues à l'issue des traitements expérimentaux sont voisines de celle du témoin non traité, sans la dépasser, contrairement à ce qui était observé à 80°C.

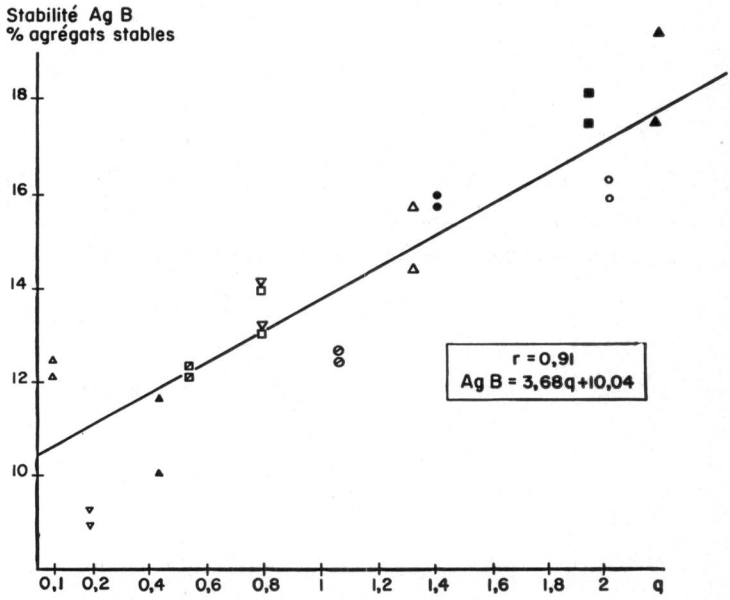


FIG. 8. — *Stabilité* (AgB) *de la terre n° 1 après saturation de durée variable puis dessiccation à différentes vitesses* (température 20°C)

$$q = \frac{\text{Temps de séjour à humidité} < 20\ \%}{\text{Temps de séjour à humidité} > 20\ \%}$$

Modalité de dessication	Temps de séjour au contact d'un plan d'eau (h)			
	0	1	3	70
20°C, ventilation	○	△	□	△
20°C, atmosphère de laboratoire sans ventilation	●	▲	■	▲
20°C, atmosphère confinée	⊖	▽	□	▽

En conservant ensuite plusieurs mois dans le laboratoire les terres sèches résultant de ces traitements, on observe une légère remontée, systématique, de la stabilité structurale, mais chacune garde l'empreinte de son histoire hydrique antérieure.

Si l'on note AgB_1 les taux d'agrégats benzène obtenus à l'issue des traitements qui viennent d'être décrits, et AgB_2 les taux d'agrégats obtenus sur les mêmes terres conservées à sec pendant trois mois, on obtient la régression suivante :

$$AgB_2 = 0{,}84\ AgB_1 + 4{,}55\ (r = 0{,}89)$$

l'augmentation systématique qu'exprime l'ordonnée à l'origine non nulle ne peut d'ailleurs être imputée sans réserves au séjour à sec : elle est de l'ordre de grandeur de certains effets série qu'il est courant d'observer pour les résultats d'analyse d'agrégats effectués sur la même terre à différents moments ou par différents opérateurs. Il se confirme donc bien (et ceci converge avec les résultats de MONNIER et KONAN) qu'à sec et à 20°C, les évolutions sont faibles ; l'eau apparaît donc comme le facteur actif dans toutes les conditions expérimentales étudiées.

3. — *Comportement de différents types de terre*

Toutes les terres mentionnées dans le tableau 1 (à l'exception de la terre n° 6) ont été soumises à un séjour à saturation de 90 heures, puis mises à sécher à l'air libre. Pour une partie de chaque échantillon, ce séchage a été interrompu à une humidité intermédiaire entre 5 et 10 p. 100. Les terres ont alors été mises en boîtes étanches et ont séjourné 110 heures environ en étuve à 80°C. La partie restante de chaque échantillon a poursuivi son séchage normalement et a subi le test d'analyse d'agrégats. Les résultats figurent dans le tableau 4.

TABLEAU 4

Stabilité structurale (AgB %) *de différents types de terre après saturation et séjour à faible humidité en étuve* (80°C)

	Fraction organique		AgB témoin non traité (%)	AgB après saturation puis dessiccation air libre à 18-20°C	Séjour à 80°C	
	C ‰	C/N			AgB après sortie de l'étuve et fin de dessiccation à l'air libre (20°C)	Humidité pendant le séjour (%)
1 (Montluel)	1,16	9,7	25,4	12,8	81,6	5,2
2 (42 P.T.)	0,70	5,9	2,6	4,0	63,8	5,4
3 (42 P.F.)	2,44	9,1	14,8	10,2	78,4	8,8
4 (Horizon B)	0,29	3,5	1,8	0,6	9,8	6,9
5 (H.B. + A.H.)	0,35	3,1	33,0	14,2	21,2	4,9

On observe que les variations du taux d'agrégats-benzène d'une colonne à l'autre sont presque toujours de même sens : diminution par rapport aux témoins du fait de la saturation, valeurs fortes après séjour à 80°C, dépassant en général les témoins (sauf dans le cas n° 5). Par contre, les amplitudes des écarts entre colonnes sont très variables d'une terre à l'autre, en valeurs absolues et relatives. Elles ne paraissent reliées de façon simple ni à la teneur en carbone, ni au rapport C/N. C'est donc une étude fine de la nature des constituants organiques présents et de leur association à la fraction minérale au sein de chaque type de terre qui serait nécessaire pour élucider les différences de réactivité des terres à l'histoire hydrique. On peut toutefois faire les remarques suivantes :

— la contribution propre des matières organiques d'apport (fumier sur la terre 42 P et acides humiques pour la terre H.B.) aux variations paraît faible ;

— si l'on excepte la terre n° 5 dont une partie des constituants organiques sont localisés plutôt à la périphérie des agrégats (ceux correspondant à l'enrichissement, car celui-ci a été pratiqué par vaporisation sur les agrégats d'une solution d'acides humiques), on remarque que le rapport des stabilités enregistrées après séjour en étuve et après saturation est d'autant plus fort que le rapport C/N est plus bas ;

— on a prélevé, au sein des échantillons très stabilisés par le séjour en étuve, des agrégats dont on a observé la mouillabilité sous binoculaire en déposant une gouttelette d'eau à leur contact. On a sectionné certains d'entre eux à l'aide d'une aiguille lancéolée et déposé les gouttelettes sur les faces de rupture ainsi délimitées. Il n'apparaît aucune différence notable de comportement entre les faces de rupture et la périphérie de l'agrégat. Elles manifestent dans les deux cas une hydrophobie très marquée. Ce fait suggère une modification *in situ* des constituants organiques par opposition à un transport dans l'eau chaude de substances semi-solubles.

— en aucun cas on n'a noté de symptômes marquants d'activité biologique tels que ceux signalés par MONNIER au cours de fermentations (observation, sous binoculaire, de filaments mycéliens, de sporulations, etc.), et correspondant parfois à des élévations importantes de stabilité structurale.

CONCLUSIONS

1° *Il se confirme que d'importantes variations de stabilité structurale peuvent avoir lieu en relation avec l'histoire hydrique de la terre.* On vérifie qu'elles sont liées à des modifications de mouillabilité des constituants organiques et que leur origine est très probablement physique et non biologique, étant donné l'intensité et la rapidité du phénomène, ainsi que les conditions de milieu dans lesquelles il se produit. Ces modifications semblent se dérouler *in situ* sans transport de substances à la périphérie des agrégats ; d'importantes différences de réactivité à l'histoire hydrique apparaissent selon les matériaux, mettant ainsi en cause la nature des matières organiques liées et leurs formes d'association au substrat minéral.

L'eau est en toutes circonstances l'agent actif de ces mod fications, sa présence conditionne aussi bien l'élévation que la chute de stabilité s ructurale. Il n'y a de baisse sensible de cette propriété que si la terre séjourne en présence d'eau saturante.

Par contre on ne peut obtenir son accroissement que si la terre séjourne à faible humidité ou se dessèche fortement, mais il n'y a pas d'évolutions importantes en l'absence d'eau dans la terre.

La température joue vis-à-vis du phénomène le rôle d'une condition : elle modifie l'amplitude des évolutions obtenues en un temps donné.

L'analyse fine des mécanismes de l'évolution de la mouillabilité suppose d'accéder aux évolutions des structures physico-chimiques des constituants organiques, en particulier aux modifications de leur surface, de la localisation des groupements hydrophobes, de leur association avec les colloïdes minéraux et avec les molécules d'eau.

2° *Les faits ainsi dégagés semblent d'une certaine importance quant aux conséquences des systèmes de cultures sur la fertilité du sol.* Ils font apparaître que l'effet améliorateur des matières organiques sur la stabilité structurale est très contingent ; on recoupe les conclusions d'observations au champ sur le comportement des lits de semence (BOIFFIN, SEBILLOTTE et DUBY, 1975).

Les conditions expérimentales dans lesquelles on a opéré peuvent être rapprochées des conditions de température et d'histoire hydrique que subit la surface d'un sol nu. Il est donc probable que des variations d'amplitude comparables à celles qui ont été obtenues ici, aient lieu au champ sur des périodes assez courtes, à la surface du sol, et de telles fluctuations ont sans doute des répercussions sur le comportement structural de cette surface sous l'action des pluies. Or, des observations sur un dispositif de longue durée en terre battante montrent que la période décisive pour les semis est en définitive assez courte (6 à 10 jours) ; en outre on a pu vérifier que la levée des semis ayant subi des orages est beaucoup plus perturbée si la terre a été soumise auparavant à une histoire hydrique humide que si elle a séjourné en conditions sèches.

Une prévision approximative des valeurs prises au champ par la stabilité structurale de la terre superficielle peut être avancée. En période humide, un minimum peu dépendant du climat, s'établit dès que la capacité au champ est dépassée, même légèrement, de façon durable.

En phase sèche, il n'y a pas de valeur de référence car l'accroissement de stabilité structurale dépend beaucoup de la température et de l'intensité de la sécheresse. Les maxima atteints augmentent avec celles-ci. En période intermédiaire, où l'humidité du sol oscille autour de la capacité au champ, un critère prédictif envisageable est le rapport entre le temps de séjour à l'humidité inférieure à la capacité au champ et le temps de séjour à humidité égale ou supérieure.

3° *Sur le plan méthodologique*, les conclusions de MONNIER et KONAN (1968) sont confirmées, quant à la nécessité de maintenir la température à moins de 20°C au cours du séchage des terres dont on veut ensuite comparer les stabilités structurales. On y ajoutera la recommandation d'homogénéiser les vitesses de dessiccation, qui peuvent être assez variables à 20°C, selon la ventilation des locaux. Enfin, quant aux époques de prélèvements au champ, on choisira de préférence l'hiver si l'on doit comparer plusieurs sols, surtout s'ils sont soumis à des régimes climatiques différents.

Reçu pour publication en juillet 1976.

REMERCIEMENTS

Ce travail nous a été confié par M. SEBILLOTTE, Maître de Conférences à l'Institut national agronomique Paris-Grignon, qui nous a également prodigué conseils et critiques au cours de sa réalisation. Nous l'en remercions vivement.

SUMMARY

WATER EVOLUTION AND STRUCTURE STABILITY OF THE SOIL

When submitting soil samples to simplified water evolution under laboratory conditions, it was observed that their structure stability varies in relation with a change in the wettability of the organic constituents.

Low values are rapidly obtained when the soil stays in presence of a water excess even low. To obtain high values a stay under dry conditions is necessary, but the presence of a minimum water amount is required.

Temperature modifies the importance of the evolutions obtained in a given time. Various relationships between the structure stability and the characteristics of water evolution in the soil are set forth. The agronomical an methodological consequences are dealt with.

ZUSAMMENFASSUNG

WASSERENTWICKLUNG UND STRUKTURFESTIGKEIT DES BODENS

Bodenproben wurden vereinfachten Wasserentwicklungen im Laboratorium unterworfen und es festgestellt dass ihre Strukturfestigkeit in Beziehung mit einer Veränderung der Benetzungsfähigkeit der organischen Bestandteile variiert.

Niedrige Werten sind schnell erreicht, wenn der Boden einem selbst geringen Wasserübersschusse unterworfen bleibt. Die Erreichung hoher Werzen erfordert ein Bleiben unter trockenen Bedingungen, aber auch das Vorhandensein einer minimalen Wassermenge.

Die Temperatur ändert die Stärke der während eines bestimmten Zeitabschnitts erzielten Entwicklungen. Verschiedene Beziehungen zwischen der Strukturfestigkeit und den Merkmalen der Wasserentwicklung des Bodens werden festgestellt. Die landwirtschaftskundlichen und methodologischen Folgen sind erlaütert.

РЕЗЮМЕ

Водное прошлое и прочность структуры почвы.

Ж. БУАФФЕН.

Почвенные образцы подвергались в лаборатории простым поочередным смачиваниям и высушиваниям, и велось наблюдение за изменением прочности их структуры, в зависимости от степени смачиваемости органических составных.

Когда почва находилась в условиях даже слабого избытка влаги, низкие величины получались очень быстро. Получение-же крупных величин требовало пребывания в засушливых условиях, но присутствия, вместе с тем, минимальных количеств влаги. Амплитуда отмеченных за определенное время колебаний изменялась в зависимости от температуры.

В работе указываются различные соотношения между прочностью структуры и характером водного прошлого почвы, и рассматриваются агрономические и методологические последствия.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BACHELIER G., 1964. Observation sur la dynamique d'un sol de type brun calcaire. *Cahiers ORSTOM, Pédologie*, **1**, 13-28.

BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., DUBY Camille, 1975. Influence des conditions écologiques et de l'histoire culturale sur le rendement du maïs-grain. Analyse de 8 campagnes sur un essai de longue durée. *Ann. agron.*, **26** (5), 555-591.

BOIFFIN J., SEBILOTTE M., 1976. Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ. *Ann. agron.* **27** (3), 295-325.

COLLIER D., 1969. *Essai de synthèse sur la cinétique de la minéralisation de l'azote humique des sols et applications.* C.R.A. Clermont-Ferrand, Station d'Agronomie.

COMBEAU A., QUANTIN P., 1963. Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. *Cahiers ORSTOM, Pédologie*, **3**, 17-30.

FÉODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol (indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **11**, 651-659.

HÉNIN S., 1938. *Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres.* Thèse Paris.

HÉNIN S., MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité structurale du sol. *C. R. VIe Congrès intern. Sci. sol*, Paris, vol. B, 49-52.

HÉNIN S., TURC L., 1949. Nouvelles observations sur la variation annuelle de la stabilité structurale du sol. *C. R. Acad. Agric.*, n° 35.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Paris.

MONNIER G., KONAN L., 1968. Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (5), 541-551.

NEVO Z., HAGIN J., 1965. Changes occuring in soil samples during air dry storage. *Soil Sci.*, **102**, 3, 157-160.

PÉRIGAUD S., 1963. Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne. *Ann. agron.*, **14** (2), 121-193 ; (3), 261-377.

SEBILLOTTE M., 1968. Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture *Ann. agron.*, **19** (4), 403-414.

Ann. agron., 1976, **27** (4), 465-475.

LES EFFETS DE LA POLLUTION FLUORÉE SUR LE POMMIER MODIFICATIONS DES ULTRASTRUCTURES FOLIAIRES

S. CHEVALIER, C. HUGUET* et M. LUTTRINGER**

Laboratoire de Physiologie végétale,
Université des Sciences et Techniques du Languedoc, C. N. R. S.,
34060 Montpellier Cedex

* *Laboratoire d'Agronomie,*
** *Station d'Étude de la Pollution atmosphérique,*
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,
84140 Montfavet

RÉSUMÉ

La pollution fluorée, qu'elle soit d'origine industrielle ou réalisée expérimentalement, induit chez le Pommier *Golden delicious* des nécroses à l'extrémité apicale des jeunes feuilles, mais elle ne semble pas affecter les fruits.

En bordure des zones nécrosées, comme à l'extrémité apicale des feuilles polluées qui ne présentent aucun symptôme macroscopique, les ultrastructures cellulaires et, en premier lieu, celles des chloroplastes se modifient et tendent à dégénérer.

I. — INTRODUCTION ET HISTORIQUE : MISE AU POINT DES TRAVAUX RELATIFS A LA SENSIBILITÉ DES PLANTES AUX COMPOSÉS FLUORÉS

Depuis plusieurs décennies, de nombreuses études ont mis l'accent sur le rôle polluant des composés fluorés atmosphériques vis-à-vis des plantes. Les dommages dont ils sont responsables, déjà signalés en 1914 par SORAUER, ont été par la suite décrits d'une manière détaillée par ONG (1946) qui s'est particulièrement intéressé à ceux subis par l'abricotier : brunissure, nécrose et flétrissement des feuilles, défoliation des arbres en sont les différents aspects. Plus récemment, TRESHOW et PACK

(1970) ont présenté une revue assez complète des symptômes relevés sur les feuilles de diverses espèces, cultivées ou spontanées, qu'ils ont classées d'après leur sensibilité ou leur tolérance aux composés fluorés. Ainsi, parmi les arbres fruitiers, *Prunus armeniaca, Prunus persica, Prunus domestica* se classent parmi les espèces sensibles, tandis que *Malus sylvestris, Prunus avium, Juglans nigra, Juglans regia* se rattachent à un groupe de moindre sensibilité. BOLAY *et al.* (1971) font état, sur des pommiers *cultivar Golden delicious* pollués par le fluor, de lésions qui affectent les fruits et qui se traduisent par un roussissement de l'épiderme avec formation de crevasses, la partie apicale de la pomme restant vert foncé.

Des études histologiques ont été conduites par SOLDBERG, ADAMS et FERCHAU (1955) sur *Pinus ponderosa* dont on connaît la sensibilité aux composés fluorés, par SOLDBERG et ADAMS (1956) sur plusieurs dicotylédones et par TRESHOW (1956) sur l'Abricotier et le Prunier ; ces auteurs ont mis en évidence la réponse des tissus foliaires aux fumigations d'acide fluorhydrique ; ils ont montré l'altération des cellules, d'abord dans le parenchyme lacuneux, puis dans le parenchyme palissadique, et, en dernier lieu, la plasmolyse des épidermes ; ces dommages microscopiques ne s'observent, toutefois, que dans le voisinage immédiat de la zone nécrosée.

Les premières études cytologiques ont été effectuées en microscopie photonique. SOLDBERG, ADAMS et FERCHAU (1955) signalent, dans les aiguilles de *Pinus ponderosa*, la dispersion dans le cytoplasme des structures chloroplastiques à la suite de la destruction de l'enveloppe plastidale. MCNULTY et NEWMAN (1961) observent, dans des feuilles de haricot (*Phaseolus vulgaris*), après addition de fluorure de sodium au milieu de culture, une dégradation de la structure des chloroplastes accompagnée d'une diminution de la teneur en pigments.

Enfin la microscopie électronique a permis, depuis ces dernières années, de préciser les transformations subies par les divers organites cellulaires sous l'effet du fluor. Selon TIMMERMAN (1967), la dégénérescence des chloroplastes est la première manifestation visible dans les feuilles de cotonnier (*Gossypium hirsutum*) : dans les cellules du mésophylle proches de la zone nécrosée, l'enveloppe plastidale se gonfle et, fréquemment, les thylakoïdes se désorganisent ; lorsque les dommages s'accroissent, les enveloppes chloroplastiques et mitochondriales se fragmentent ; les mitochondries paraissent toutefois plus résistantes que les chloroplastes. ENGELBRECHT (1970) observe, dans les parties jaunissantes et brunissantes de feuilles de canne à sucre (*Saccharum officinarum*) exposées à une atmosphère fluorée, une diminution de la taille des chloroplastes, du nombre et de la taille des granums et l'augmentation en nombre et en volume des gouttelettes lipidiques ; comme TIMMERMAN, cet auteur met en évidence le fait que le chloroplaste est le premier organite atteint dans la cellule. De même, BLIGNY *et al.* (1973) décèlent des altérations précoces des chloroplastes dans l'aiguille du sapin (*Abies alba*) encore verte, dès sa sortie du bourgeon, et LHOSTE-BISCH (1974) montre que, dans la feuille de maïs (*Zea mays*) comme dans l'aiguille de sapin, les chloroplastes sont les premiers atteints par la pollution fluorée.

Par contre, selon WEI et MILLER (1972), des fumigations d'acide fluorhydrique sur des feuilles de soja (*Glycine max*) provoquent d'abord la formation, dans le cytoplasme, de petites vacuoles, formation subséquente à une fragmentation du tonoplasme et, dans certains cas, apparaissent des globules lipidiques ; ensuite les mito-

chondries s'altèrent, puis les chloroplastes, que ces auteurs placent au bas de l'échelle de sensibilité des organites cellulaires. PILET et ROLAND (1972) font agir du fluorure de sodium sur des explantats de ronce (*Rubus*) cultivés *in vitro* et montrent que le fluor est un poison de l'auxésis, essentiellement parce qu'il inhibe la synthèse des protéines ; ils constatent, en outre, des altérations de mitochondries, puis du réticulum endoplasmique et, comme CHANG (1968), un appauvrissement en ribosomes libres du hyaloplasme. D'après QUINCHE *et al.* (1974), la pollution fluorée induit, dans les cellules parenchymateuses des zones encore vertes des feuilles de poirier et de pommier, une dilatation du réticulum endoplasmique tandis que, dans les mitochondries, les crêtes deviennent plus nombreuses, allongées et gonflées, et que le stroma apparaît plus dense aux électrons.

Ainsi, et bien que leurs résultats diffèrent quant aux sensibilités relatives des organites cellulaires, tous ces auteurs s'accordent pour reconnaître l'induction de modifications ultrastructurales par la pollution fluorée.

Notre étude se propose d'analyser les modifications subies par les ultrastructures de la feuille de pommier sous l'effet de la pollution fluorée.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

Notre matériel expérimental est constitué par des pommiers (*Pyrus malus*), *cultivar Golden delicious*. D'après les travaux de DE CORMIS (1972), l'espèce fruitière *Pyrus malus* est classée parmi les plantes de sensibilité moyenne aux composés fluorés.

II. 1. — *Protocole expérimental*

Nous avons travaillé d'abord en conditions de pollution naturelle connues, dans des vergers d'étude situés en Savoie, et soumis à d'importantes émissions fluorées d'origine industrielle ; puis, afin d'assurer à ces premières observations une validité suffisante, nous avons poursuivi notre étude sur l'action du fluor dans le cadre plus rigoureux d'enceintes à fumigation.

II. 11. *Pollution industrielle.*

Les vergers étudiés sont situés dans un périmètre de 5 kilomètres autour de l'usine traitant l'alumine. En particulier, nous avons retenu dans la zone urbaine d'Albertville une parcelle de pommiers *Golden delicious* âgés d'une dizaine d'années et conduits en gobelets.

Afin de contrôler les effets qu'exerce la pollution fluorée sur les organes foliaires et fructifères des pommiers, nous avons procédé à la mise en place de structures de protection constituées par des sachets de papier sulfurisé disposés sur une vingtaine de bouquets floraux par arbre, avant le stade floraison qui a été atteint vers la fin d'avril. Le système est maintenu en place après la pollinisation et au cours du grossissement des jeunes fruits. Ces organes protégés constituent les témoins.

II. 12. *Pollution contrôlée.*

Nous avons cherché à reproduire expérimentalement les lésions sur feuilles en soumettant quelques branches de pommier *Golden* à des fumigations fluorées. Nous avons opéré dans un verger non pollué par les gaz fluorés (verger de l'I.N.R.A., à Montfavet).

Les vapeurs fluorées appliquées aux arbres sont obtenues à partir d'une solution aqueuse d'acide fluorhydrique débitée par une pompe péristaltique dans un tube de cuivre chauffé. Une micropompe assure la progression des vapeurs formées à ce niveau jusqu'à l'entrée d'une turbine qui distribue l'air fluoré dans les enceintes.

La teneur de l'air en gaz fluorhydrique dépend de la concentration de la solution d'acide fluorhydrique et de sa vitesse de vaporisation. Un étalonnage préalable, tenant compte de ces deux variables, est réalisé après fixation des fluorures sur tampons absorbants en cellulose (Millipore) imprégnés d'une solution de soude N. A la sortie des enceintes, l'air circule au contact de soude en paillettes afin de capter les vapeurs fluorées et d'éviter ainsi de contaminer les arbres voisins.

Nous avons adopté successivement l'un des dispositifs suivants :

— en 1973, les extrémités de quatre rameaux par arbre sont mises dans des enceintes à fumigation (20 × 60 cm) constituées d'un film de polyéthylène souple soudé sur place autour des organes à traiter. Le débit d'air dans les enveloppes transparentes est maintenu à 4 ou 5 l/s de façon à éviter toute condensation (fig. 1) ;

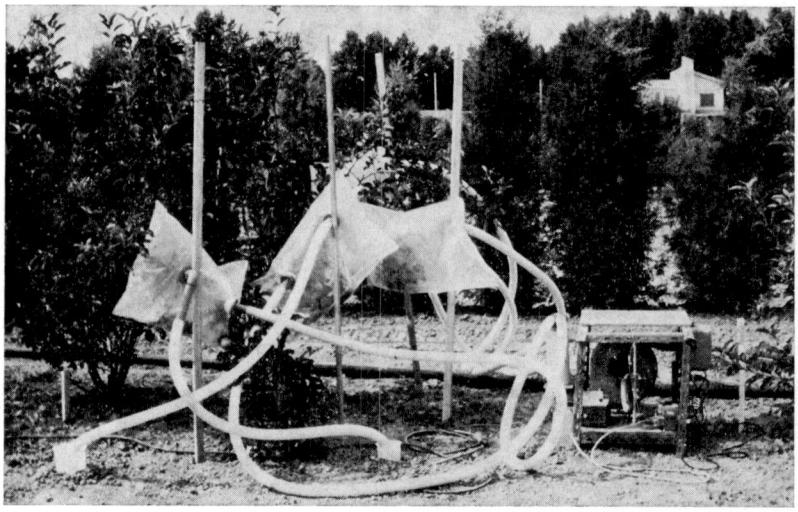


FIG. 1. — 1973. — *Pollution fluorée de branches de pommier*

— en 1975, chaque arbre, lorsqu'il atteint le stade F_2, est recouvert d'une chambre en polyéthylène souple correspondant à un volume de 16,4 m³ (fig. 2). Par les armatures verticales constituées de tubes perforés sont admises les vapeurs fluorés qui maintiennent, pendant quatre heures, l'atmosphère des arbres aux concentrations choisies.

FIG. 2. — 1975. — *Pollution fluorée d'un pommier dans une chambre en polyéthylène*

II. 2. — *Techniques de dosage du fluor*

Pour ces dosages, nous avons utilisé un ionomètre avec une électrode spécifique des ions F^-.

Dans les expériences en pollution industrielle, les dérivés fluorés sont fixés sur un papier Whatman n° 1, imprégné par la chaux ; le papier, placé sur un support, est disposé à 2 mètres du sol, sous abri, pour éviter les contaminations par les poussières, et reste exposé pendant un mois environ (technique mise au point par la Station de pollution atmosphérique de Montfavet). Le papier est ensuite calciné pendant deux heures à 600°. Le résidu de calcination, qui contient les fluorures, est additionné de silice (1 g) et soumis à un entraînement à la vapeur d'eau (145°-155°) en présence de 25 ml d'acide sulfurique ($d = 1,83$) jusqu'à obtention de 250 ml de distillat sur lequel se font les dosages. Les valeurs relatives de la pollution sont exprimées en unités arbitraires ($\mu g/dm^2/j$).

Dans les expériences de pollution contrôlée, les fluorures sont fixés sur tampons absorbants de cellulose Millipore imprégnés d'une solution de soude N. La solution analysée est obtenue en traitant les tampons avec de l'eau bi-distillée (LINGANE, 1968). Les concentrations en fluor sont exprimées en $\mu g/m^3$.

Enfin, pour les dosages effectués sur les feuilles, le matériel végétal séché à 80° pendant vingt-quatre heures (3 g), est broyé puis calciné pendant deux heures à 600° en présence d'un poids équivalent d'un mélange d'acétate de magnésium (2 vol.) et de magnésie (1 vol.). Le résidu de la calcination est traité comme dans les expériences réalisées en pollution industrielle. La concentration en F^- est exprimée en p.p.m. par rapport à la matière sèche.

II. 3. — *Techniques d'étude des ultrastructures*

L'analyse des modifications ultrastructurales a porté sur des feuilles de rangs 2 et 3 comptées à partir de l'extrémité des rameaux de l'année, provenant soit de pommiers ayant subi une fumigation fluorée expérimentale, soit d'arbres pollués par des effluents industriels. Dans les deux cas, les tissus destinés à l'examen microscopique ont été prélevés en bordure de la nécrose apicale (ou à l'extrémité apicale, même s'il n'existait pas de symptômes apparents) et en différents endroits du limbe ; ils ont été comparés à des échantillons de même niveau de feuilles non polluées du même âge, considérés comme témoins. Le matériel a été fixé pendant deux heures au glutaraldéhyde à 4 p. 100 (tampon cacodylate de sodium pH 7,5) et post-fixé une heure à l'acide osmique à 2 p. 100, puis inclus dans le spurr après déshydratation par l'alcool et par l'oxyde de propylène. Les coupes ont été contrastées au citrate de plomb et à l'acétate d'uranyle avant d'être examinées au microscope électronique JEM 100. Notre étude a porté sur les cellules du parenchyme.

III. — RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III. 1. — *Symptômes macroscopiques*

En pollution fluorée industrielle comme en pollution contrôlée, les feuilles de pommier présentent des anomalies qui se traduisent par un brunissement de l'extrémité apicale ; cette nécrose des tissus est accompagnée d'une déformation du limbe qui donne à l'organe une forme incurvée caractéristique. La localisation de ces lésions pourraient s'expliquer par le fait que la partie du fluor non arrêtée par la cuticule de la feuille se trouve entraînée passivement, en grande partie par le courant de sève brute, et ainsi transportée vers l'extrémité des organes foliaires, comme l'ont montré les travaux de DE CORMIS (1968) réalisés sur plantes annuelles.

L'administration, pendant quatre heures, de gaz fluoré, à une concentration en ions fluor de 60 $\mu g/m^3$, à de très jeunes feuilles parvenues au stade « oreille de souris » (1re ou 2e feuille sous le méristème terminal) provoque, dans les quarante-huit heures qui suivent, l'apparition de lésions typiques localisées à l'extrémité du limbe dont la morphologie se modifie : l'incurvation du limbe accompagne la nécrose apicale (fig. 3). Par contre, les feuilles d'âge plus avancé ou adultes au moment où elles sont soumises à l'émission de vapeurs fluorées ne présentent par la suite aucun symptôme visible.

Par ailleurs, au cours de nos observations, nous n'avons pas relevé, même sur les fruits, d'autres symptômes caractéristiques attribuables à la pollution fluorée.

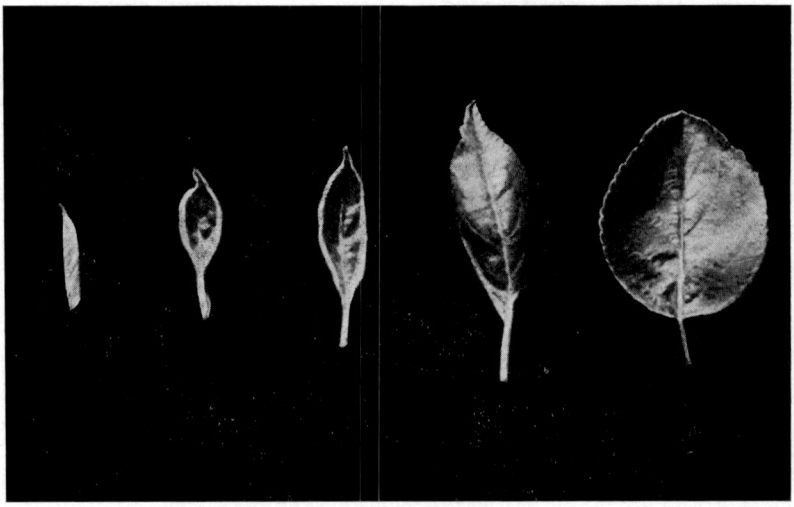


FIG. 3. — *Symptômes de pollution fluorée sur feuilles de pommier*

III. 2. — *Étude des concentrations en fluor des feuilles*

En 1973, après la fumigation fluorée, nous avons procédé à un prélèvement de feuilles sur les branches traitées, de façon à évaluer leurs teneurs en cet élément comparativement à des feuilles homologues non traitées considérées comme témoins. Les taux de fluor, exprimés en p.p.m. par rapport à la matière sèche, s'établissent comme suit :

— feuilles témoins ..... 49 p.p.m.
— feuilles soumises à une pollution contrôlée ..... 81 p.p.m.
(concentration en fluor de l'atmosphère : 60 μg F/m³)

Ces résultats confirment la fixation du fluor par ces organes.

En 1975, les teneurs en fluor des feuilles polluées expérimentalement sont moins importantes :

— feuilles témoins ..... 26 p.p.m.
— feuilles traitées ..... 37 p.p.m.
(concentration en fluor de l'atmosphère : 350 μg F/m³)

Comme on peut le remarquer, en 1975, la teneur en F^- des feuilles soumises à la pollution fluorée n'est pas élevée, mais les feuilles apparaissent cependant perturbées.

Par ailleurs, dans les feuilles de pommier de vergers pollués par les effluents industriels, nous avons relevé des teneurs en fluor plus faibles :

— *le 23-4-1975 :*
— feuilles polluées ..... 27 p.p.m.
— feuilles protégées ..... 18 p.p.m.
— *le 3-7-1975 :*
— feuilles polluées ..... 39 p.p.m.
— feuilles protégées ..... 23 p.p.m.

Ces dernières évaluations correspondent à des concentrations en fluor atmosphérique dans le verger qui ont été les suivantes :

Mars	3,48	µg/dm²/jour
Avril	1,60	—
Mai	4,45	—
Juin	4,02	—

III. 3. — *Étude ultrastructurale*

III. 31. *Localisation des symptômes microscopiques.*

Dans les conditions de notre expérience de pollution contrôlée comme dans le cas de la pollution industrielle, chez la feuille de pommier, les altérations des ultrastructures demeurent localisées dans une zone étroite (1 à 2 mm), en bordure immédiate de la nécrose apicale. Le reste du limbe est indemne. Il est intéressant de souligner que les modifications cellulaires s'observent aussi dans les extrémités apicales des feuilles polluées encore entièrement vertes, avant même que tout signe extérieur de nécrose ne se manifeste.

Cette stricte localisation des symptômes dans la feuille de pommier polluée est en accord avec les travaux de De Cormis (1968), de Garrec *et al.* (1972) et ceux de Bligny *et al.* (1972) sur la répartition du fluor dans la feuille ; ces auteurs montrent que le fluor s'accumule presque en totalité à l'extrémité des organes foliaires où sa concentration peut devenir importante ; il n'est donc pas surprenant qu'à ce niveau, lorsque le seuil de toxicité est dépassé, les structures cellulaires s'altèrent et que le métabolisme soit perturbé.

III. 32. *Modification des ultrastructures.*

Dans cette zone étroite où sont circonscrits les symptômes microscopiques, la paroi cellulosique des cellules s'est épaissie de façon très importante dans tout le parenchyme (pl. I, fig. 4 et 5) ; par suite de la disparition presque complète de la lamelle pectique, les cellules ont tendance à s'isoler les unes des autres et à s'arrondir (pl. II, fig. 6). Les divers organites subissent des modifications plus ou moins importantes.

Le plasmalemme se décolle de la paroi cellulosique à laquelle il n'adhère plus parfois qu'en certains points et présente ainsi un contour irrégulier, en dents de scie (pl. I, fig. 5 et pl. II, fig. 6). Un fait semblable se produit dans l'apex de l'orge (Marinos, 1967) et dans les feuilles de plantules de pommier carencées en calcium (Chevalier et Huguet, résultats non publiés).

Les chloroplastes sont les organites cellulaires les plus atteints par la pollution fluorée. Dans les plastes des feuilles saines, des thylakoïdes, dont l'espace central est transparent aux électrons, traversent un stroma assez dense. Les disques granaires, en nombre variable et empilés irrégulièrement, constituent des granums hétérogènes (pl. II, fig. 7).

Dans la feuille polluée, les structures des chloroplastes se modifient et dégénèrent. Un premier stade très éphémère, et dont nous ne saurions affirmer qu'il se produit dans tous les cas, prélude à la différenciation du système lamellaire. Les thylakoïdes

granaires et intergranaires présentent un espace central, devenu fortement opaque aux électrons, bordé par une bande étroite peu colorée par l'osmium (pl. III, fig. 8). LHOSTE-BISCH (1974) indique, dans les chloroplastes de maïs pollué, la disparition de l'espace interne des disques granaires et l'attribue à la perte à ce niveau de la phase aqueuse. Chez le pommier, l'image des thylakoïdes diffère de celle observée par LHOSTE-BISCH et semble correspondre à un remaniement moléculaire affectant leurs membranes ; cette image est identique à celle décrite au cours de l'évolution plastidale des feuilles de pommier carencé en magnésium (CHEVALIER et HUGUET, 1975), de pariétaire carencée en calcium (DURAND et CHEVALIER, 1969) ou souffrant d'un excès de cet ion (CHEVALIER, BACCOU et SAUVAIRE, 1969) et des feuilles panachées de *Coleus hybrida* (MARTY, 1968).

Puis les limites entre les disques granaires disparaissent progressivement ; les thylakoïdes granaires, à l'intérieur de chaque granum, confluent, transformant chacun d'eux en une plage membranaire désorganisée dans laquelle l'empilement initial des disques granaires superposés ne se discerne plus. Par contre, l'ancien arrangement, encore visible, des granums et des thylakoïdes intergranaires témoigne que le fluor n'avait pas inhibé la formation des lamelles ; celles-ci se sont différenciées complètement et ont ensuite dégénéré. Parfois, une apparition inhabituelle de globules lipidiques dans le stroma coïncide avec la dégénérescence des structures lamellaires (pl. III, fig. 9) ; le fait n'étant pas constant, il est difficile d'établir ici une relation de cause à effet.

Il arrive que l'enveloppe plastidale externe fasse défaut, tout au moins en partie (pl. III, fig. 9) ; plusieurs auteurs ont également signalé sa fragmentation et même sa disparition complète sous l'effet du fluor ; néanmoins, un doute subsiste sur cette perte, partielle ou totale, de l'enveloppe des chloroplastes ; il est possible, en effet, que, rendue plus fragile par la pollution fluorée, cette membrane n'ait pas résisté à la fixation.

Le fait que les structures plastidales soient les plus profondément atteintes est en accord avec les travaux de LEDBETTER *et al.* (1960) et de CHANG et THOMPSON (1966) montrant que, si cet halogène se fixe en partie au niveau des parois cellulaires, la fraction chloroplastique est son site préférentiel d'accumulation et contient environ 60 p. 100 du fluor total.

Si les structures des chloroplastes sont les premières et les plus gravement touchées par la pollution fluorée, celles des mitochondries sont aussi perturbées. Certaines, cependant, conservent un aspect normal et parfois même présentent des crêtes très dilatées (pl. IV, fig. 10 et 11). De nombreux travaux, en particulier ceux de MCNULTY et NEWMAN (1957) et de HILL *et al.* (1959), ont montré, en effet, qu'à certaines doses, le fluor peut stimuler le métabolisme et induire une exaltation respiratoire mais très souvent, les crêtes confluent, dégénèrent et les mitochondries prennent l'aspect d'amas indifférenciés de membranes dans lesquels l'enveloppe externe ne se distingue plus, soit qu'elle ait disparu sous l'effet de la pollution, soit que, devenue plus fragile, elle n'ait pas résisté à la fixation (pl. IV, fig. 10). Une dédifférenciation analogue des crêtes mitochondriales avec disparition de l'enveloppe externe s'observe aussi dans la feuille de plantule de pommier carencée en calcium (CHEVALIER et HUGUET, résultats non publiés) et prélude, comme dans les taches nécrosées dues à la pollution fluorée, à la mort des cellules.

IV. — CONCLUSION

Sous l'effet de la pollution fluorée, le chloroplaste est le plus gravement atteint de tous les organites cellulaires. Ces résultats sont en accord avec les travaux d'autres chercheurs sur l'action de divers agents polluants auxquels le chloroplaste réagit toujours le premier (THOMSON *et al.*, 1965 ; ANDERSON *et al.*, 1970 ; WELLBURN *et al.*, 1972 ; SWANSON *et al.*, 1972). D'une façon plus générale d'ailleurs, le chloroplaste est l'organite le plus sensible à tout ce qui perturbe la vie de la cellule et il réagit aussitôt par des modifications de structure. Cette sensibilité a été observée dans maintes carences (MARINOS, 1962 ; THOMSON et WEIER, 1962 ; POSSINGHAM, VESK et MERCER, 1964 ; THOMSON, WEIER et DREVER, 1964 ; DURAND et CHEVALIER, 1969 ; WHATLEY, 1971 ; CHEVALIER et HUGUET, 1975) comme dans le cas d'un fort excès de calcium (CHEVALIER, BACCOU et SAUVAIRE, 1969) ou de conditions défectueuses d'éclairement ou de pH (MURAKAMI *et al.*, 1970).

Mais la pollution fluorée ne perturbe pas que les chloroplastes ; les autres structures cellulaires sont touchées à leur tour ; le plasmalemme se décolle de la paroi cellulosique ; les divers organites se modifient et dégénèrent ; la mort de la cellule devient alors imminente. Ces symptômes n'étant pas généralisés, leur stricte localisation à l'extrémité apicale du limbe réduit leur gravité du point de vue du métabolisme de la plante entière.

Enfin, l'analogie des modifications ultrastructurales entre la pollution fluorée et la carence calcique est évidente ; or, le fluor est susceptible de former avec le calcium un complexe insoluble ; on peut donc se demander si les modifications ultrastructurales observées à la suite d'une pollution fluorée ne seraient pas la conséquence de la carence calcique localisée qui en résulterait. Néanmoins, cette identité des symptômes peut aussi être interprétée comme une certaine spécificité de réaction des ultrastructures liée à l'espèce elle-même : en effet, chez le Pommier, l'évolution des divers organites diffère peu, qu'elle soit suscité par une carence calcique, une carence magnésienne ou la pollution fluorée.

Reçu pour publication en septembre 1976.

SUMMARY

EFFECTS ON APPLE-TREE OF THE POLLUTION DUE TO FLUORINE CHANGES IN THE LEAF ULTRASTRUCTURES

The pollution due to fluorine either released by industry or experimentally spread causes in Golden delicious apple-trees necroses at the apical end of the young leaves, but does not seem to affect the fruits.

On the edge of the necrosed zones as well as at the apical end of the polluted leaves which present no macroscopic symptom, the cell ultrastructures and first of all the chloroplast ones alter and tend to degenerate.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE WIRKUNGEN DER FLUORBESCHMUTZUNG AUF DEN APFELBAUM AENDERUNGEN DER BLAETTERULTRASTRUKTUREN

Die entweder industriell oder experimentell erzeugte Fluorbeschmutzung führt zu Nekrosen auf den Oberenden der jungen Blätter von Golden delicious Apfelbaümen aber scheint nicht die Früchte zu befallen.

Am Rande der Nekrosen wie auch auf den Oberenden der beshmutzten Blätter, die keine augenscheinliche Erscheinung darbieten, ändern sich und neigen die Zellultrastrukturen und vor allem die Chloroplastultrastrukturen zum Verfallen.

РЕЗЮМЕ

Фтористое загрязнение на яблоне. — Изменения ультрасструктур листьев.

С. ШЕВАЛЬЕ, К. ХЮГЕ, М. ЛЮТТРЕНЖЕ.

Фтористое загрязнение, будь-то промышленного происхождения, или вызванное экспериментальным способом, индуцирует на яблоне сорта « Гольден Делишес » некрозы апикальных конечностей молодых листьев, но кажется не затрагивает фруктов. Вдоль границ некротических зон, также как и на апикальных конечностях загрязненных листьев не несущих никаких макроскопических симптомов, изменяются ультраструктуры клеток, и особенно хлоропластов, с тенденцией к вырождению.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON J. L., SCHAELLING J. P., 1970. Effects of pyrazone on bean chloroplast ultrastructure. *Weed Sci.*, **18**, 455-459.

BLIGNY R., GARREC J. P., FOURCY A., 1972. Migration et accumulation du fluor chez *Zea mays*. *C. R. Acad. Sci.*, **275**, 755-758.

BLIGNY R., BISCH A. M., GARREC J. P., FOURCY A., 1973. Observations morphologiques et ultrastructurales des effets du fluor sur les cires épicuticulaires et sur les chloroplastes des aiguilles de sapin (*Abies alba* MILL). *J. Microscopie*, **17**, 207-214.

BOLAY A., BOVAY E., NEURY G., QUINCHE J. T., ZUBER R., 1971. Dégâts causés aux abricots et à d'autres fruits par les composés fluorés. Tiré à part n° 909, *Rev. Suisse de Viticult. et Arboricult.*, mai-juin, **3**, 82-92.

CHANG C. W., 1968. Effect of fluoride on nucleotides and ribonucleic acid in germinating corn seedling roots. *Plant Physiol.*, **43**, 669-678.

CHANG C. W., THOMPSON C. R., 1966. Site of fluoride accumulation in navel orange leaves. *Plant Physiol.*, **41**, 211-213.

CHEVALIER S., BACCOU J. C., SAUVAIRE Y., 1969. Influence d'un excès de calcium sur la structure et le fonctionnement des chloroplastes du *Parietaria officinalis* L. *C. R. Acad. Sci.*, **269**, 1653-1656.

CHEVALIER S., HUGUET C., 1975. Effets d'une déficience en magnésium chez le Pommier. Évolution des ultrastructures de la feuille de pommier carencé. *Ann. agron.*, **26**, 351-362.

DE CORMIS L., 1968. Absorption des fluorures en solution et migration du fluor chez la Tomate. *Ann. Physiol. vég.*, **10**, 155-169.

DE CORMIS L., 1972. L'arbre dans la ville. *Journées d'étude de l'Horticulture et des pépinières*, Paris, 24 février, 37-52.

DURAND M., CHEVALIER S., 1969. Étude de l'action de la carence calcique sur la structure du méristème caulinaire et des premières feuilles du *Parietaria officinalis* L. *C. R. Acad. Sci.*, **269**, 48-50.

ENGELBRECHT A. H. P., 1970. Effects of hydrogen fluoride on the ultrastructure of mesophyll cells of sugar cane. *VIIe Congrès international de Microscopie électronique*, Grenoble, **3**, 421-422.

GARREC J. P., LIGEON E., BLIGNY R., FOURCY A., 1972. Localisation exacte du fluor le long d'aiguilles polluées d'*Abies alba* par microanalyse au moyen de protons. *C. R. Acad. Sci.*, **274**, 3468-3471.

HILL A. C., PACK M. R., TRANSTRUM L. G., WINTERS W. S., 1959. Effects of atmospheric fluorides and various types of injury on the respiration of leaf tissue. *Plant Physiol.*, **34**, 11-16.

LEDBETTER M. C., MAVRODINEAU R., WEISS A. J., 1960. Distribution studies of radio active fluorine^{-18} and stable fluorine^{-19} in tomato plants. Contribution from *Boyce Thompson Institute*, **20**, 331-348.

LINGANE J. J., 1968. Further study of the fluoride membrane electrode for potentiometric determination and titration of fluoride. *Ann. Chem.*, **40**, 935-939.

LHOSTE-BISCH A. M., 1974. *Étude en microscopie électronique de l'action du fluor sur les chloroplastes de sapin* (Abies alba *M.*) *et de maïs* (Zea mays *L.*). Thèse de 3e cycle, Grenoble, mai.

MCNULTY I. B., NEWMAN D. W., 1957. The effect of fluoride fumigation on the chlorophyll content of leaves. *Plant Physiol.*, **32**, 121-124.

MCNULTY I. B., NEWMAN D. W., 1961. Mechanisms of fluoride induced chlorosis. *Plant Physiol.*, **36**, 385-387.

MARINOS N. G., 1962. Studies on microscopic aspects of mineral deficiencies. I. Calcium deficiency in the shoot apex of barley. *Amer. J. Bot.*, **49**, 834-841.

MARINOS N. G., 1967. Multifunctional plastids in the meristematic region of potato tuber buds. *J. Ultrast. Res.*, **17**, 91-113.

MARTY D., 1968. Variations infrastructurales dans les chloroplastes de feuilles panachées de *Coleus hybrida*. *Ann. Sci. Bot.*, 12e série, **9**, 575-608.

MURAKAMI S., PACKER L., 1970. Protonation and chloroplast membrane structure. *J. Cell. Biol.*, **47**, 332-351.

DE ONG R., 1946. Injury to apricot by fluorine deposit. *Phytophath.*, **36**, 469-471.

PILET P. E., ROLAND J. C., 1972. Effets physiologiques et ultrastructuraux du fluor sur des tissus de ronce cultivés *in vitro*. *Bull. Soc. Bot. Suisse*, **82**, 269-283.

POSSINGHAM J. V., VESK M., MERCER F. V., 1964. The fine structure of leaf cells of manganese deficient spinach. *J. Ultrast. Res.*, **11**, 68-83.

QUINCHE J. B., BALET A. L., BURON A., VOGEL F., 1974. La pollution par les composés fluorés et ses effets sur les arbres fruitiers du Valais. *Bull. de la Murithienne*, **91**, 18-25.

SOLDBERG R. A., ADAMS D. F., FERCHAU H. A., 1955. Some effects of hydrogen fluoride on the internal structure of *Pinus ponderosa* needles. *3rd Nat. Air Pollution Symp.*, 164-176.

SOLDBERG R. A., ADAMS D. F., 1956. Histological responses of some plants leaves to hydrogen fluoride and sulfur dioxide. *Amer. J. Bot.*, **43**, 755-760.

SORAUER T., 1914. Non parasitic diseases. *In Manual of plant diseases*, **1**, 729-730. Wilkes Barre, Penn Record.

SWANSON E. S., THOMSON W. W., MUDD J. B., 1972. The effect of ozone on leaf cell membranes. *Can. J. Bot.*, **51**, 1213-1219.

THOMSON W. W., WEIER T. E., 1962. The finestructure of chloroplasts from mineral deficient leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Amer. J. Bot.*, **49**, 1047-1055.

THOMSON W. W., WEIER T. E., DREVER H., 1964. Electron microscopic studies of chloroplasts from phosphorus deficient plants. *Amer. J. Bot.*, **51**, 933-938.

THOMSON W. W., DUGGER M. W., PALMER R. L., 1965. Effects of peroxyacetyl nitrate on the ultrastructure of chloroplasts. *Bot. Gaz.*, **126**, 66-72.

THOMSON W. W., DUGGER M. W., PALMER R. L., 1966. Effects of ozone on the fine structure of the palisade parenchyma cells of bean leaves. *Can. J. Bot.*, **44**, 1671-1682.

TIMMERMAN J. D., 1967. *Effects of hydrogen fluoride accumulation on plant cell microstructure and ultrastructure*. Texas A et M Univ. Ph. D. Botany, 1-126.

TRESHOW M., 1956. The effects of fluoride on the anatomy of Chinese apricot leaves. *Phytopath.*, **46**, 640.

TRESHOW M., PACK M. R., 1970. *Fluoride*, chap. III : Recognition of Air Pollution injury to vegetation : a pictural Atlas. Ed. by Jay F. Jacobson and A. Clyde Hill.

WEI L., MILLER G. W., 1972. Effect of HF on the fine structure of mesophyll cells from *Glycine* max MERR. *Fluoride*, **5**, 67-73.

WELLBURN A. R., MAJERNIC O., WELLBURN F., 1972. Effects of SO_2 and NO_2 polluted air upon the ultrastructure of chloroplats. *Environ. Pollut.*, **3**, 37-49.

WHATLEY J. M., 1971. Ultrastructural changes in chloroplats of *Phaseolus vulgaris* during development under conditions of nutrient deficiency. *New Phytol.*, **70**, 725-742.

PLANCHES

PLANCHE I

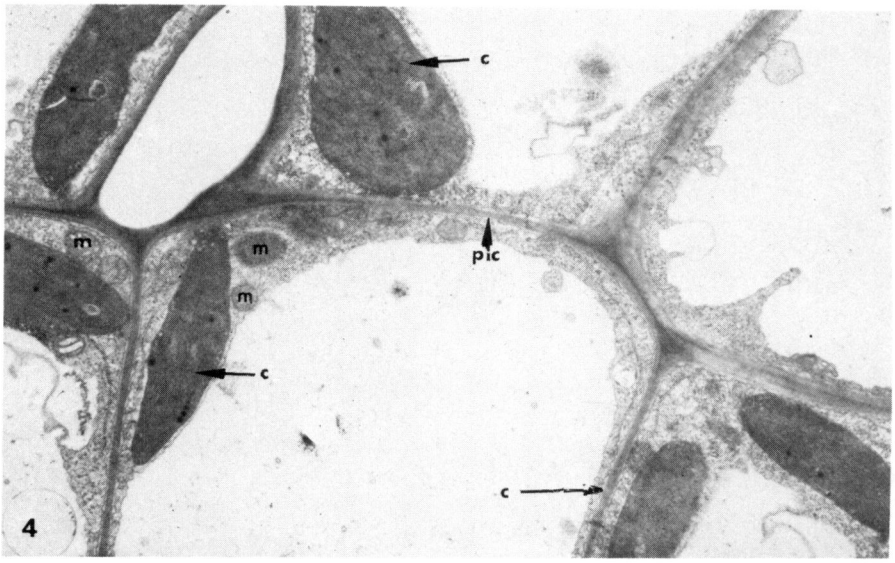
c : chloroplaste
m : mitochondrie
n : noyau
p : plasmalemme
pc : paroi cellulosique

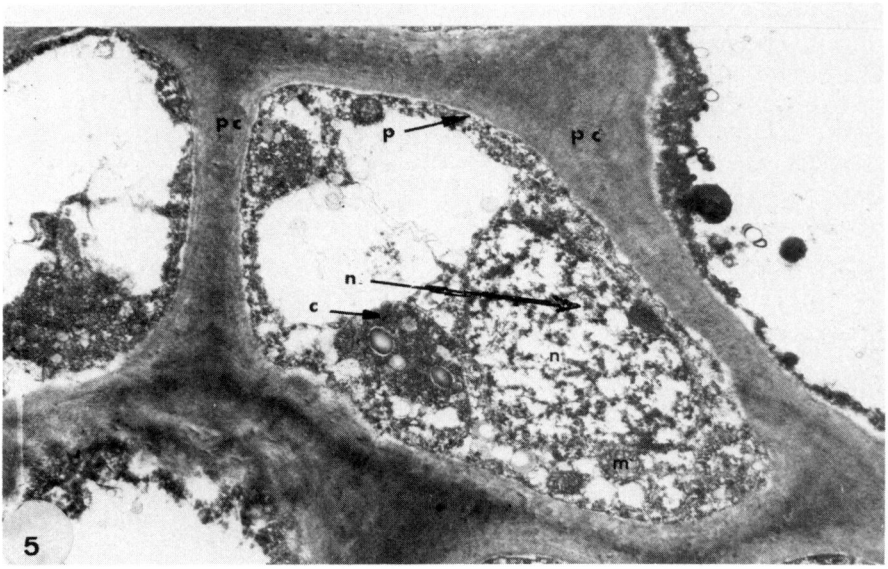
FIG. 4. — × 5 000

Dans les cellules parenchymateuses des feuilles saines, la paroi cellulosique (pc) présente une épaisseur normale et le plasmalemme lui est étroitement accolé.

FIG. 5. — × 7 000

Dans le parenchyme des feuilles polluées par HF, la paroi cellulosique (pc) des cellules s'est épaissie de façon considérable ; le plasmalemme (p) s'est décollé de la paroi cellulosique à laquelle il n'adhère plus qu'en certains points, ce qui lui confère un contour irrégulier, en dents de scie.





Simone CHEVALIER, Claire HUGUET et M. LUTTRINGER

PLANCHE II

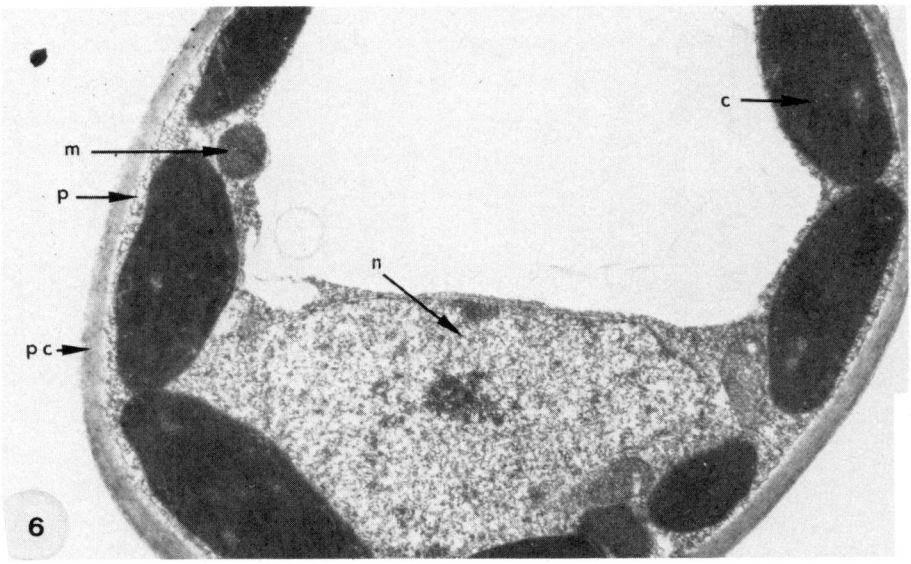
c : chloroplaste
e : enveloppe plastidale
g : granum
l : loculus
m : mitochondrie
n : noyau
p : plasmalemme
pc : paroi cellulosique
t : thylakoïde

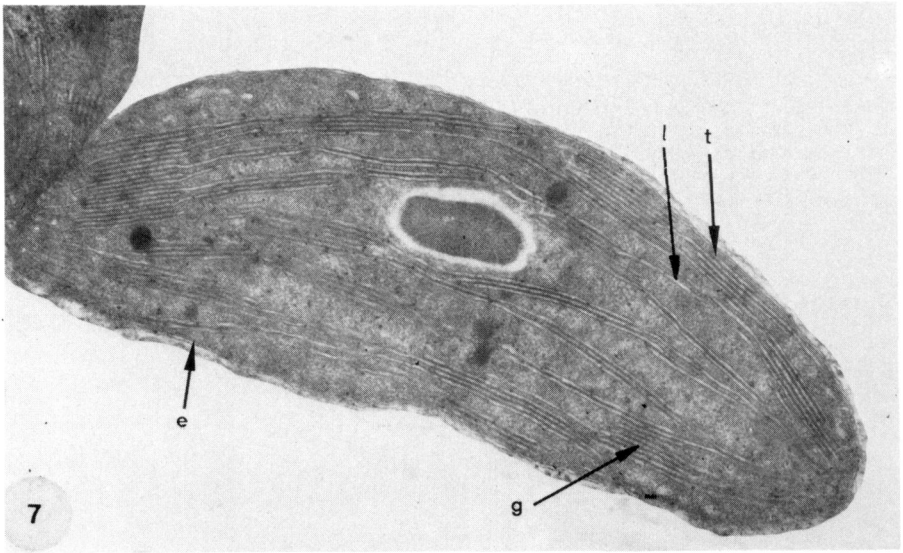
Fig. 6.

Par suite de l'élargissement considérable des méats, cette cellule apparaît presque entièrement isolée ; sa paroi cellulosique (pc) est devenue très épaisse ; le plasmalemme (p) s'en est décollé, ne conservant avec elle que de fines adhérences (× 10 000).

Fig. 7.

Dans ce chloroplaste d'une feuille saine, les structures sont normales ; les thylakoïdes (t) présentent un espace central ou loculus (l) transparent aux électrons ; les empilements irréguliers de disques granaires constituent des granums (g) très nets. La double enveloppe (e) est visible sur toute la périphérie de l'organite (× 24 000).





Simone CHEVALIER, Claire HUGUET et M. LUTTRINGER

PLANCHE III

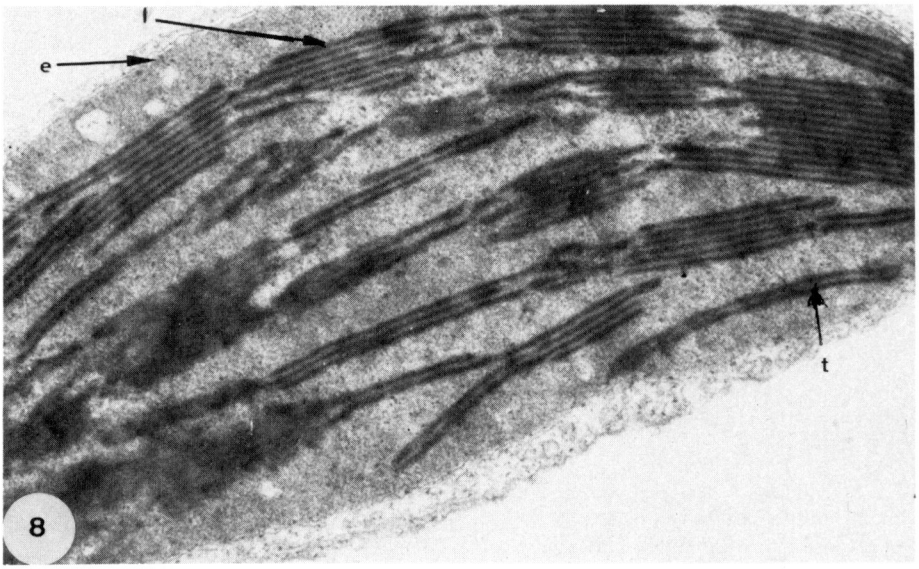
e : enveloppe plastidale
g : granum
gl : globule lipidique
l : loculus
t : thylakoïde

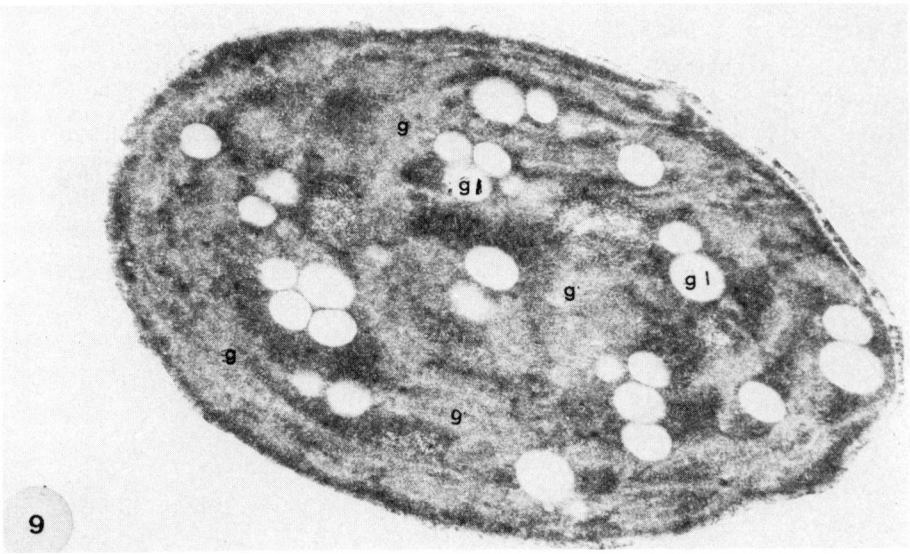
Fig. 8.

Dans ce chloroplaste d'une feuille polluée par HF, les structures sont modifiées. L'espace central (l) des thylakoïdes (t) est fortement opaque aux électrons tandis que les parois apparaissent en clair. La double enveloppe (e) est encore visible (× 35 000).

Fig. 9.

Ce chloroplaste d'une feuille polluée par HF est à un stade plus avancé de modification. La double enveloppe plastidale manque sur toute la périphérie de l'organite. Les granums (g) sont transformés en plages membranaires dans lesquelles l'empilement primitif des disques granaires ne se distingue plus. On remarque dans le stroma la formation de nombreux et volumineux globules lipidiques (non colorés sur cette photographie) (× 24 000).





Simone CHEVALIER, Claire HUGUET et M. LUTTRINGER

PLANCHE IV

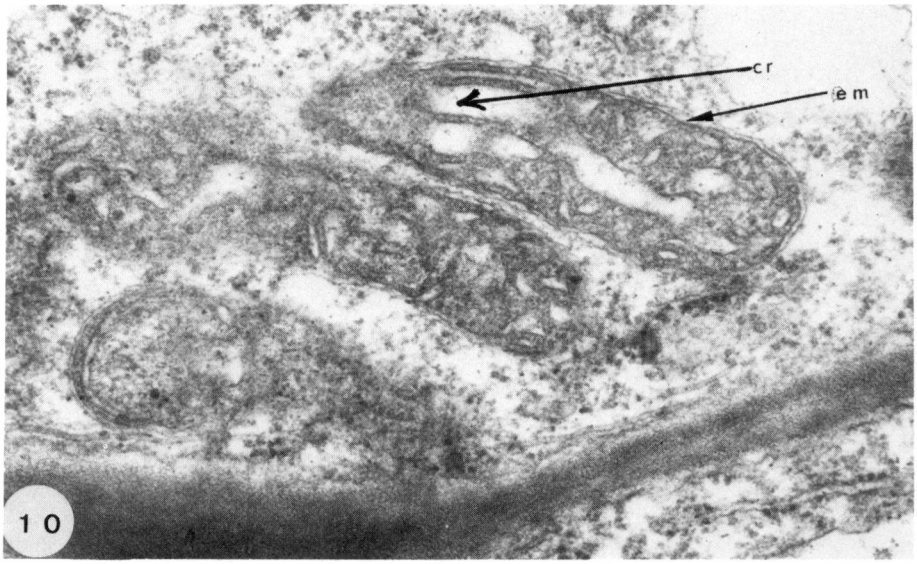
cr : crête mitochondriale
em : enveloppe mitochondriale

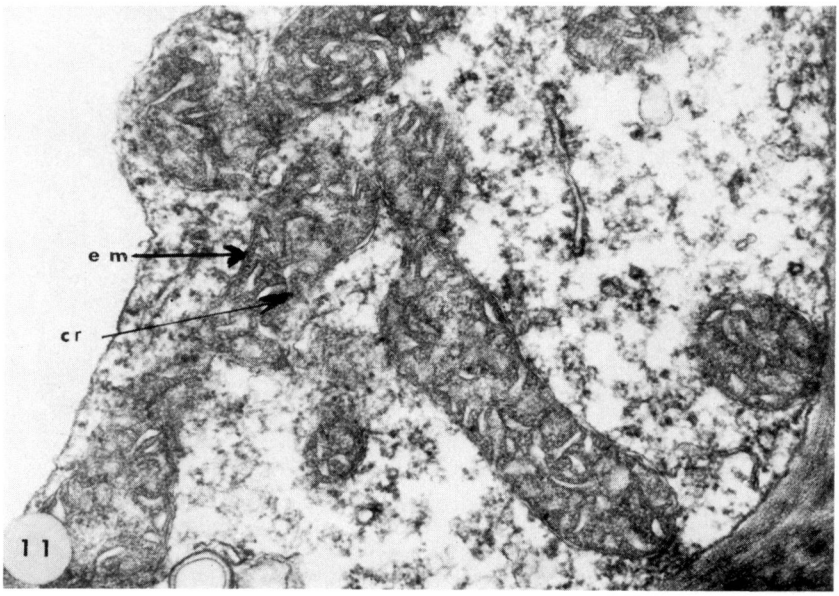
Fig. 10.

Dans cette portion de cellule de feuille polluée, on peut observer trois stades différents de l'évolution des structures mitochondriales. La mitochondrie supérieure présente des crêtes anormalement développées ; son extrémité gauche commence à se modifier et à perdre l'enveloppe externe. La mitochondrie du milieu est à un état plus avancé de modification. La mitochondrie inférieure a perdu son enveloppe sur presque toute sa surface et les crêtes se sont transformées en amas de membranes (× 40 000).

Fig. 11.

Mitochondries normales d'une feuille non polluée (× 27 000).





Simone CHEVALIER, Claire HUGUET et M. LUTTRINGER

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* en anglais ou destinés à être traduits en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivis (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible aprés clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité des tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Agronomie.

annales agronomiques

Essais de fertilisation de très longue durée
Colloque international — Grignon, 6-7-8 juillet 1976

Very long-term fertilizer experiments
International Conference — Grignon, 6-7-8th July 1976

Bimestriel

1976

Vol. 27. N° 5. 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Jahre aufeinanderfolgen, können für eine moderne Auswertung nutzbare Informationen bringen wenn die zugeführten Düngergaben geeignet sind. Versuche in denen alle Jahre nur eine Kultur ausgeiühzt ist, sind weniger nutzlich und diese, die ausgeführt wazen, sind geändert oder unterbrochen worden.

Die alten Weideversuche könnten heute nicht mehr verwertbare Informationen liefern und sind unterbrochen worden. Die Versuche auf geschnittene Wiesen geben noch brauchbare Informationen selbst nach 120 Jahre Erprobung.

Neue Untersunchugen über die langfristige Versuche, die noch im laufe sind, werden beschrieben. Sie haben Auskünfte über diese bedeutungsvollen Themen geliefert :

1. Langfristige Vergleichungen von organischen Düngern mit chemischen Düngern.
2. Änderungen in den Bodenreserven an organischen Substanzen, Stickstoff, Phosphor und Kalium, die aus dem Kultursystem und der Düngung resultieren.
3. Nährstoffbilanz.
4. Befreiung von Nährstoffen, die aus den Bodenreserven herkommen.
5. Bedeutung der Rückstände von chemischen und organischen Düngern.
6. Bilanz der anderen Makroelemente und der Mikronährstoffe des Bodens.
7. Eichung und Prüfung der Methoden zur Bodenanlyse.
8. Wirkungen einer Kultur auf die nachfolgenden.

Die fortgesetzten Versuche wurden geändert, um das Kultursystem, die Düngung und die Landwirtschaft an den neuen Bedingungen anzupassen. Sie erfüllen standardisierte unvergleichlichen Bedingungen, die über die Wirkung der Witterungsverhältnisse auf die Kulturen und die Böden und auf die für die Bodenfruchtbarkeit aussclaggebenden Faktoren mehr Auskünfte erteilen. Die unter den im 19ten Jahrhundert begonnenen Versuchen forgesetzten Versuche werden wahrscheinlich wenigstens bis zum Jahre 2000 brauchbar sein.

РЕЗЮМЕ

Долгосрочные опыты удобрения в Англии. — Важность полученных результатов для сельскохозяйственных науки и практики.

Г. В. КУКЕ.

Долгосрочные опыты удобрения представляют ценный способ получения сведений, позволяющих управлять сельскохозяйственным прогрессом. Правильно поставленные опыты, данные для которых были собраны полностью, создают идеальные условия для определения действия удобрений и систем культур на свойства почв и продуктивность растений.

В данной работе описываются опыты, поставленные в Англии и продолжавшиеся больше 50-ти лет. Таких опытов было 6 в Ротхемштете, 2 — в Вобэрне (Бедфордшайр), 2 — в Саксмундхеме (Суффольк) и 4 в Кокль-Парке (Нортумберланд). В четырех из опытов Ротхемштета и в обоих опытах Воберна велась одна только культура, а 4 остальных опыта с главными культурами следовали за четырехпольным севооборотом : пшеница, пропашная культура, ячмень, бобовое. И 4 последних опыта велись на постоянных лугах, из которых два служили пастбищем, а два других скашивались для получения сена.

Опыты с одной только культурой показали ее реакцию на внесение испытывавшихся удобрений, и, затем служили для определения изменений произошедших в запасах питательных веществ почвы, а системы культур чередовались таким образом чтобы была возможность получить от них сведения соответствующие современным условиям. Опыты сево-

conditions idéales pour mesurer les effets des engrais et des systèmes de culture sur les propriétés des sols et sur la productivité.

Cet article présente des essais réalisés en Angleterre sur une période de plus de cinquante ans. Les essais étaient au nombre de six à Rothamsted, de deux à Woburn (Bedfordshire), de deux à Saxmurdham (Suffolk) et de quatre à Cockle Park (Northumberland). Quatre des essais à Rothamsted et les deux essais à Woburn ne comportaient qu'une seule culture ; quatre autres essais sur plantes de grande culture succédaient à l'assolement quadriennal de blé, plante sarclée, orge, légumineuse. Quatre essais étaient consacrés à des prairies permanentes ; deux étaient pâturés et les deux autres fauchés pour la production de foin.

Les essais sur une seule culture ont montré comment elles réagissaient vis-à-vis des engrais testés. Par la suite, ils ont servi à mesurer les changements intervenus dans les réserves du sol en éléments nutritifs et le système de culture a été modifié de manière à fournir des renseignements correspondant aux conditions actuelles. Les essais de rotation dont les 4 cultures sont réalisées chaque année sont susceptibles de fournir des données qui intéressent les exploitations modernes, à condition que les doses d'engrais utilisées soient appropriées. Les expérimentations ne comportant qu'une seule culture par an sont moins utiles, si bien qu'elles ont été modifiées ou supprimées.

Les anciens essais sur pâturages n'ont pas permis d'obtenir les types de renseignements recherchés et ont été arrêtés. Les essais sur prairies fauchées continuent à fournir des renseignements utiles, même après 120 années d'expérimentation.

Cet article comporte une description de travaux récents sur des essais de longue durée qui existent toujours ; ils ont permis de recueillir une information sur les sujets importants suivants :

1° Comparaison en essais de longue durée entre des engrais organiques et des engrais minéraux.
2° Modifications des réserves du sol en matière organique, en azote, en phosphore, et potassium en fonction du système de culture et de la fertilisation.
3° Bilans des éléments nutritifs.
4° Libération des éléments nutritifs à partir des réserves du sol.
5° Valeur des reliquats d'engrais et de fumiers.
6° Bilans des autres éléments nutritifs majeurs et des oligo-éléments dans le sol.
7° Mises au point et étalonnage des méthodes d'analyse de sols.
8° Effets d'une culture sur les cultures suivantes.

Les essais encore maintenus à l'heure actuelle ont été adaptés aux conditions modernes de culture, de fumure et d'élevage, Ils offrent des conditions uniques de standardisation permettant de mieux étudier les effets des conditions climatiques sur les cultures et les sols, et sur les facteurs qui régissent la fertilité du sol. Parmi ces essais commencés au XIXe siècle, ceux qui sont poursuivis encore aujourd'hui pourront certainement être utiles au moins jusqu'à l'an 2000.

ZUSAMMENFASSUNG

LANGFRISTIGE DÜNGUNGSVERSUCHE IN ENGLAND : BEDEUTUNG IHRER ERGEBNISSE FÜR LANDWIRTSCHAFTSKUNDE UND-PRAXIS

Langfristige Versuche sind besonders geeignet, um Auskünfte zu erteilen, die Kennlinien in Landwirtschaft festzustellen erlauben. Sorgfältige und völlig verzeichnete Versuche in denen die Böden — und Kulturenzusammensetzungen bestimmt sind, bieten ideale Bedingungen für die Schätzung der Wirkungen der Dünger und Kultursysteme auf die Bodeneigenschaften und — fruchtbarkeit.

Versuche, die während mehr als 50 Jahre in England durchgeführt worden sind, sind beschrieben. Es gab sechs Versuche in Rothamsted, zwei in Woburn (Bedfordshire), zwei in Saxmundham (Suffolk) und vier in Cockle Park (Northumberland). Vier unter den sechs Versuche von Rothamsted und die beiden von Woburn betrafen eine einzige Kultur ; vier anderen bestellbaren Versuche bestandenaus einer vierjährigen Fruchtfolge von Weizen, Rübe, Gerste und Hülsenfrüchte. Vier Versuche fanden auf Dauerwiesen statt ; zwei dienten als Weide und die zwei anderen wurden für Heuernte benutzt.

Die Experimente auf einzige Kulturen zeigten wie diese auf die studierten Dünger zurückwirken. Deswegen wurden sie gebraucht, um die Schwankungen der Bodennährstoff reserven zu bestimmen und das Kultursystem ist heute geändert worden, um den modernen Bedingungen entsprechende Informationen zu erhalten. Fruchtfolgeversuche in denen die vier Kulturen alle

as well as providing extra nitrogen. A crop of grass that depletes potassium reserves nevertheless improves soil structure, and this effect may be very important on some physically 'difficult' soils ; but the root mass left by the grass, which is responsible for the better structure, may also immobilize much nitrogen while it decomposes and rob the following crop.

The Classical experiments have been used to investigate some of these effects. Studies of nutrient deficiencies caused by continuous cropping, and the construction of balance sheets have already been discussed ; gains of nitrogen from growing legumes are indicated by the Agdell experiment ; Broadbalk fallow sequences show that more nitrogen is available in soil when wheat is not grown for one year. Broadbalk field has been a site for weed studies over many years and also for work on the fungus diseases which attack cereals when these are grown successively. Examples are 'eyespot' (caused by *Cercosporella herpotrichoides*) and 'take-all' (caused by *Gaeumannomyces graminis*). Recently the cyst nematode (*Heterodera avenae*) has been studied in Hoosfield soil.

The effect of one crop on another has long been a source of interest to agricultural scientists and the DUKE of BEDFORD and PICKERING (1914) wrote an early paper (with the title of this section of this paper) describing results in long-continued experiments on the effects of grass on apple trees at Woburn. They concluded that the grass produced toxins which affected the growth of the trees. In fact the idea of toxic substances excreted from roots affecting other plants is very old and RIPLEY (1941) reviewed the early literature. Most of the dramatic effects of one crop on succeeding crops that have been identified have been from the causes listed above. However, much recent work has shown that root exudates from one plant may affect the growth of other plants and chemical effects cannot be ruled out.

Future possibilities

The modifications made recently to the Classical experiments, and particularly the introduction of crop rotations on Broadbalk, Hoosfield and Barnfield, should provide material for detailed studies of factors that increase and decrease yields. The careful standardised way in which the experiments are made, and the large yields now grown, provide very sensitive tests of the effects of differences in weather and soil conditions. They may well provide evidence of damage by diseases or predators not yet recognised, or of chemical or biochemical mechanisms that affect yields of crops grown in different sequences.

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

ESSAIS D'ENGRAIS DE LONGUE DURÉE EN ANGLETERRE
IMPORTANCE DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LES SCIENCES AGRICOLES ET LA PRATIQUE

Les essais de longue durée constituent un moyen précieux pour obtenir des renseignements qui permettent de guider les progrès de l'agriculture. Des essais bien conduits sur lesquels toutes les données ont été recueillies et la composition des sols et des cultures déterminée offrent des

calcareous soils which had received rock phosphate but nervertheless grew poor crops. We found that the solution of 0.5 M $NaHCO_3$ (pH 8.5) proposed by OLSEN *et al.* (1954) distinguished soils rich and poor in 'available' phosphate where rock phosphates had been applied. Largely as a result of our work on soils from the Classical experiments this sodium bicarbonate method has been adopted as the standard method for measuring soluble P by the Agricultural Development and Advisory Service who are responsible for advising farmers in England and Wales.

The Classical experiment sites have also been used to show the value of SCHOFIELD'S (1955) method of measuring phosphate potential by equilibrating soil with a solution of 0.01 M calcium chloride. We have also showed how measurements of total P distinguish soils which have received many dressings of phosphate from those which have received none.

The total amount of K in Rothamsted soils often depends more on clay content than on past manuring and such measurements do not distinguish soils containing residues of K fertilizers from those containing none. Exchangeable K, measured by leaching with IN-ammonium acetate, does indicate differences in soluble K which are related to past cropping and manuring. Most methods which depend on replacing K^+ by NH_4^+ give closely similar results.

THE EFFECT OF ONE CROP UPON ANOTHER

Crops affect the yields of those that follow in three important ways.

1. *Nutritional effects* are associated with enrichment, for example by the supplies of extra N left in soil by the residues of legumes, or depletion — where large quantities of potassium are removed by crops (*e. g.* grasses or kale) that usually receive little K-fertilizer. Effects of these kinds on potassium reserves are often large and develop quickly ; corresponding effects on the supplies of phosphorus to following crops have not been recorded.

2. *Structure* and *organic matter* contents of soils are affected by cropping sequence, but the effects of these properties on crop yields, if any exist, are usually entangled with much larger nutritional and crop disease effects so that no clear examples can be given.

3. *Soil-borne pests* and *diseases* vary greatly in their incidence with farming systems. Those that attacks a particular kind of plant usually multiply when susceptible crops are grown often and may then damage yields seriously. Biological troubles of this kind are common in most countries where one crop occupies much of the land in an area. Examples from English farming are the soil-borne fungus diseases of cereals which are serious problems of continuous cereal growing, and the species of nematodes that attack cereals, potatoes and other crops where the host plants are grown often.

Frequently, more than one of these effects is involved in a comparison of different cropping systems. Herbage crops add nitrogen to soil in the residues of their root systems if they are legumes ; but they also take up much potassium. The net effect depends on whether the crop is grazed (when K is returned in excreta), or is cut and removed. Legumes act as a 'break' in the transmission of soil-borne cereal diseases

THE USE OF LONG-TERM EXPERIMENTS FOR DEVELOPING SOIL ANALYSIS METHODS

Where long-term experiments have been carefully conducted for many years, and complete records have been kept of fertilizers applied, and of yield and composition of the crops removed, the soils are excellent standards for comparing and calibrating methods of soil analysis. Reference has already been made to measurements of soluble P and K in soils of the Classical experiments. An important part of the work on these soils has been to relate soil analysis data to 'balance sheets' for P(K) added *minus* P(K) removed, and also to the responses of crops to fresh dressings of P(K) fertilizer.

The earliest analyses of soils on the Classical experiments were recorded by DYER (1894). He reviewed early attempts to distinguish between total and 'available' amounts of nutrients in soils. In an earlier paper in 1872 LIEBIG had described the use of 'dilute hydrochloric acid' and 'dilute acetic acid' to show that continuously manured plots of the Broadbalk experiment at Rothamsted had more soluble phosphorus and potassium than unmanured plots; unfortunately, LIEBIG did not say how strong the acids were that he used. DYER tried extracting phosphorus and potassium by water, by solutions of carbon dioxide in water, and by ammonium citrate solutions; he eventually adopted a 1 p. 100 solution of citric acid (originally suggested by STUTZER in 1884 for valuing fertilizers, and also proposed for analysing soils) because it had roughly the same acidity as the sap of many common plants. He tested his method with soils from the Hoosfield barley experiment at Rothamsted and concluded : 'From a careful consideration of the whole of the results, it would perhaps not be unreasonable to suggest that, when a soil is found to contain as little as about 0. 01 p. 100 of phosphoric acid soluble in a 1 p. 100 solution of citric acid, it would be justifiable to assume that it stands in immediate need of phosphatic manure'. He could not decide on the limit of citric-acid soluble K which marked severe deficiency but thought it lay below 0.005 p. 100. He concluded 'the soil economy of potash is probably more complicated than that of phosphoric acid and needs a good deal of further investigation'. CHAMBERS (1953) concluded from his work on Broadbalk soils that the N-ammonium acetate exchangeable K which corresponded with no gain or loss of K in cropping was about 140 mg/kg. COOKE and WILLIAMS (1971) found that in the four-course Rotation I experiment at *Saxmundham* the corresponding figure was about 160 mg/kg; (the value of $NaHCO_3$-soluble P at which gains and losses balance was also determined for *Saxmundham*-10 mg P/kg).

The main disadvantage of DYER's solution of 1 p. 100 citric acid was that it extracted too much of the total P from soils; consequently small but agriculturally significant differences in soluble P were not detected. Many other solutions of weak acids, and dilute solutions of strong acids, were proposed to measure soluble P in the first 40 years of this century; most were tested on soils of the Rothamsted Classical experiments and they usually classified the soils according to the amounts of phosphate which we knew had been applied. All acid extractants failed to classify

tant for farmers to know how useful these residues are, but they can be properly valued only by long-term experiments where records of manuring and crop yields are kept for many years.

The important conclusions of the British experiments are :

1. The large residues accumulated in soil from long periods of manuring with phosphorus and/or potassium fertilizers have been found useful to crops in all the experiments done.

2. Large dressings of nitrogen fertilizers may have considerable residual effects on the one or two following crops on medium and heavy soils in Britain.

3. Residues of all three nutrients (nitrogen, phosphorus and potassium) applied as fertilizers cause general increases in yield and often lessen the need for new fertilizer. Perhaps even more important than the saving of fresh fertilizer is the fact that fertilizer residues often give higher yields of crops, however much new fertilizer is given. This is true for each of the three nutrients. Fertilizer residues raise the yield potential of soils under adverse conditions (such as when crops are planted on badly structured soil, or in dry weather) ; this is because crops can obtain adequate nutrients from reserves distributed through the whole cultivated zone of soil more effectively than they can take up nutrients from fresh dressings that are, inevitably, localized in only a part of the cultivated soil. In addition, nitrate residues leached into the subsoil may be of particular value to deep-rooting crops.

4. The experiments done on several kinds of soil suggest that a manuring policy which supplies more phosphorus than crops need immediately is justified on poor soils so that reserves may accumulate.

OTHER NUTRIENTS

Analyses of the standardized soils of long-term experiments can be used, together with crop analyses, to calculate balance sheets for calcium, magnesium, sulphur and micronutrients. They also give warning of deficiencies that may occur through prolonged cropping without return of particular nutrients. Magnesium and sodium salts are tested in the Rothamsted Classical experiments but none of the micronutrients are applied as fertilizers. However the FYM tested in all the experiments does supply micronutrients and unexpected symptoms or loss or yield on plots treated with NPKNaMg fertilizers, without corresponding effects on FYM-treated plots, would be expected to show a need to investigate the possibility of micronutrient deficiencies. None have appeared up to 1975.

Magnesium.

Rothamsted crops remove from 3 kg Mg (potatoes) to 12 kg Mg (lucerne, sugar beet) per hectare. These amounts are small, being of the order of those supplied as contaminants in fertilizers and liming materials plus that in rainfall. Magnesium fertilizers have been applied annually in the Rothamsted experiments but there is no evidence that they have increased yields of sugar beet, mangolds, cereals or grass. Magnesium balance in Broadbalk soils has been investigated in detail ; reserves in the soil, plus Mg in rainfall, have provided enough Mg for 130 wheat crops (BOLTON, 1972).

based on a century or more of cropping; *Saxmundham* also provides long-term estimates. At most other centres measurements have been made for only a few years, and it is not certain whether the rates of potassium supplied by soil will be maintained for longer periods.

In the Broadbalk Wheat experiment from 1852 to 1921 the soil supplied 20 kg K/ha to wheat. The amounts released to herbage in the Park Grass experiment were about the same — 16 kg K/ha annually from 1920 to 1959 on unlimed areas, 22 kg K/ha annually on limed areas. At *Saxmundham* the soil released much more — about 90 kg K/ha annually for 60 years to the four crops of Rotation I experiment.

Potassium balance sheets

As crops remove so much potassium, soils with small reserves are quickly depleted. Large dressings may be wasteful, and, if continued, allow potassium to be lost by leaching into the subsoil. It is therefore important to try to balance the amounts crops remove with fertilizer dressings and the gains and losses estimated from long-term experiments are useful for this purpose. Accounts have been published by CHAMBERS (1953) for Broadbalk Wheat experiment, by WARREN and JOHNSTON (1962) for Barnfield experiment and for *Saxmundham* Rotation I experiment by COOKE and WILLIAMS (1971). In all three experiments there were linear relationships between the amounts of exchangeable potassium and the balance between losses of K (in crops) and gains of K (in fertilizers applied).

The value of potassium fertilizer residues

The responses by successive crops to a single large dressing of potassium fertilizer diminish rapidly in the years after the dressing is given, just as happens with phosphorus fertilizers. Although the residual effect of one dressing is small, the total residues from many applications have large effects on crops and may supply enough potassium for full yields. As with measurements of the value of residues of phosphorus fertilizers, long-term experiments where the soils have received repeated dressings of potassium for many years give unique opportunities for examining fertilizer residues. In the experiments at Rothamsted fertilizers given at relatively low rates for long periods have left useful residues in the soil even when the crops grown are removed. JOHNSTON and MATTINGLY describe the results in a later paper.

SUMMARY OF EXPERIMENTAL WORK ON FERTILIZER RESIDUES

Single-year crops rarely use all of the nutrients in dressings of fertilizers and manures. In our climate much of any surplus of nitrogen is lost by leaching or denitrification before another crop is grown, but excesses of phosphorus and potassium from fertilizers or manures are retained by the soil. These additions of P and K to soil reserves are *slightly* soluble in water and a small proportion can be used each year by crops. The residual effect of a *single* dressing of phosphorus and potassium fertilizer is usually so small that it cannot be measured accurately in field experiments, but the *total* effect of the residues from many individual dressings is large and easy to measure, both chemically and in terms of extra crop yields. It is impor-

Eighty years ago DYER (1894) showed that in the Rothamsted experiments where phosphate fertilizers were continuously applied, the soil contained much more phosphorus soluble in citric acid solution ; he accounted for 86 p. 100 of the phosphate added, and thought the remainder had been lost by leaching. Soils from other continuous experiments also contained residues that Dyer found to be soluble ; they were *presumed* to be useful but no field experiments were done to *prove* that the reserves built up by continued manuring could supply P to crops, nor were they valued in terms of the effects of fresh dressings of phosphorus fertilizer. Work done in Britain during the last 20 years has provided information of this kind ; it is reviewed by MATTINGLY and JOHNSTON and by ARNOLD.

POTASSIUM

In contrast with phosphorus, crops remove large weights of K ; up to 200 kg K/ha may be contained in an arable crop at maximum uptake. Even larger quantities may be taken up by grassland receiving much N fertilizer or by leguminous herbage crops. Fertilizers are rarely applied at rates which supply such large quantities and the net result of intensive cash cropping on arable land, or 'zero-grazing' of herbage crops, where fertilizers are used at conventional rates, may be to deplete soil K reserves. On the contrary large dressings of animal manures supply much K ; where large amounts of slurry are frequently applied the concentration of K in grass becomes very large. It is important to monitor these changes and adjust dressings of K from manures and fertilizers to prevent both loss of crop from K-deficiency or undesirably large accumulations of K. Measurements on soils of long-term experiments supply this information in a unambiguous way.

Movement into subsoils

In all of the Classical experiments at Rothamsted analyses show that some of the potassium applied has penetrated at least 60 cm deep in a century and some may have been lost in drainage (WARREN, 1956 ; WARREN and JOHNSTON, 1962 ; WARREN and JOHNSTON, 1964).

Potassium released from soils in long-term experiments

The amounts of potassium that are regularly released from soils over long periods must be taken into account when planning the amounts of fertilizer that should be applied. Often in establishing new and more intensive agricultural systems farmers rely on soil to supply the extra potassium needed and restrict spending to nutrients (such as nitrogen and phosphorus) that soils cannot supply sufficiently. In established farming systems a good long-term fertilizer policy is to supply as much potassium as yields remove, but it is often convenient to rely on the reserve in the soil for short periods. In either of these circumstances, a knowledge of the long-term rates of release of potassium from soil that could be relied on in normal cropping would help in planning manuring. The Rothamsted experiments provide information

experiment where the drainage water from plots having nitrogen fertilizer contained no more nitrate at the end of winter than plots having no nitrogen fertilizer. In a lecture in 1891, WARINGTON said : « The very similar amount of nitrate passing away during the winter is a striking illustration of the well-known fact that ammonium salts leave no residue in the soil which is of use to the next season's crop. » These views long dominated thinking on nitrogen residues.

Exhaustion Land

Early evidence that nitrogen fertilizers do leave residues that benefit the next crop came from the Exhaustion Land experiment ; 25 years of continuous manuring to some of the plots stopped in 1901. Yields of subsequent cereals grown without fertilizer showed that dressings of inorganic nitrogen fertilizers had large residual effects in the first year after the dressing stopped, but much smaller effects in the second and third years. The residual effects of FYM were at first similar to those from NPK fertilizer, but they lasted much longer and were well-maintained in the third crop taken in 1904. The residual effects of both FYM and fertilizers 16-18 years after the dressings stopped were small and were probably due to the phosphorus and potassium that these materials had supplied. This experiment showed that a period of manuring with inorganic nitrogen fertilizers can leave a residue in soil that benefits several following crops, but it could not show whether the residue was of inorganic nitrogen, or was nitrogen combined with organic matter in crop residues and roots.

The Classical experiments could provide no further information on nitrogen fertilizer residues. Conclusive evidence of the large amounts that may persist in soil from one season to the next had to wait until modern short-term experiments were made.

PHOSPHORUS

When poor soils are first brought into intensive agriculture, phosphate (with lime on acid soils) is usually the first fertilizer needed. Crops take up less P than is supplied by the dressings customarily applied and the surplus accumulates in soil. The net result of fertilizing land at the rates usually used is to build up a reserve of soil P. Long-term experiments have had an essential role in showing the rates of accumulation of both P and K ; recently they have been modified to provide measurements of the *value* of these reserves to crops. (JOHNSTON, WARREN and PENNY (1970) have described the early results of this work.)

Most British farmers dress their arable land each year with phosphate fertilizers and some of this accumulates in the soil. This process has been going on for over a century in areas of Britain which have long used fertilizers and phosphorus equivalent to a third or even a half of the total amounts now present in some of our soils has accumulated in this way. These old reserves *are* useful to crops though their value is not always recognized. Short-term experiments do not show the cumulative value of residues from small annual dressings repeated over very many years ; our only evidence on the usefulness of building up *considerable* reserves of phosphorus in soil by fertilizer programmes, is derived from a few long-term experiments at Rothamsted and other centres.

CHANGES IN NUTRIENT RESERVES IN SOILS OF LONG-TERM EXPERIMENTS

Long-term experiments are valuable for monitoring the changes in nutrient reserves in soils. This information is needed for forecasting the effects of farming systems on soils and planning the efficient use of fertilizers. Only one set of data on the soils of long-term experiments are given in detail ; they are in table 5.

TABLE 5

Analyses of Broadbalk soils after 100 years of treatment

Annual treatment	Kg N/ha	$CaCO_3$ (%)	Total N (%)	Total C (%)	Total P (mg/kg)	$NaHCO_3$ soluble P (mg/kg)	Exch. K (mg/kg)
FYM*	0	2.0	0.236	2.58	1 214	97	655
None	0	2.4	0.106	1.09	580	8	102
PK+	0	1.7	0.105	1.00	1 084	80	364
PK+	48	1.2	0.112	1.07	1 079	88	368
PK+	96	0.8	0.121	1.19	1 052	88	341
PK+	144	0.5	0.123	1.19	1 119	81	295

FYM* : Farmyard manure at 35 t/ha.
PK+ : 73 kg P_2O_5/ha as superphosphate
+ 110 kg K_2O/ha as potassium sulphate
+ 16 kg Na/ha as sodium sulphate
+ 11 kg Mg/ha as magnesium sulphate.

INORGANIC NITROGEN

Broadbalk drains

In 1849 a tile drain was laid down the centre of each of the plots. The drains were not intended for experimental use, but in 1866 they were opened and the drainage water collected from each plot was first analysed by VOELCKER in 1866-68 to estimate the losses of plant nutrients by leaching. The biggest loss from this calcareous soil was of calcium carbonate, and it increased with increasing amounts of ammonium salts given to the plots. Much nitrate was lost and this also increased with the amount of ammonium salts added. Phosphate, although applied in water-soluble form, was almost completely retained, and the loss of potassium though measureable, was small.

The common view that inorganic nitrogen fertilizers leave no residues for a following crop seems to have been derived originally from the Broadbalk Wheat

Age of grassland	Per cent of nitrogen in soil
0 (Arable)	0.12
10	0.15
20	0.16
38	0.20
200 (Old Park)	0.25

Permanent grassland is the nearest in agriculture to a 'natural system' ; nitrogen accumulates in the soil until an equilibrium value for per cent N is reached, the mechanisms of gain and loss that control the amount of nitrogen are not clear. WARREN and JOHNSTON (1964) have shown how liming and fertilizer affected per cent of nitrogen in the soils of the Park Grass experiment at Rothamsted ; the treatments have been continuous since 1856, but the experiment was established on 'park' grassland that was already very old ; after 100 years of treatment the values for per cent of carbon and per cent of nitrogen must be at equilibrium. The maximum variation in per cent of nitrogen in the surface soils caused by manuring was from 0.21 to 0.35 p. 100 of nitrogen, and by liming from 0.21 to 0.32 p. 100. These large differences from common agricultural treatments are mostly, though not entirely, related to differences in pH. They show how difficult it is to make any use of so-called 'equilibrium per cent of nitrogen values' in commenting on the nitrogen status of farmed grassland soils.

Natural conditions.

Two 'wildernesses' established at Rothamsted about 90 years ago are good examples of such gains. Geescroft wilderness was allowed to become derelict after the land carried a clover crop in 1883. Broadbalk wilderness after wheat was sown in 1881 ; both soils contained 0,108 p. 100 of nitrogen. At sampling in 1904 legumes were almost entirely absent from Geescroft (only 0.4 p. 100 of all the plants present), yet the gain of nitrogen was two-thirds as much as in Broadbalk wilderness where 25 p. 100 of the vegetation was legumes. After 20 years of this natural 'fallowing', there was 0.145 p. 100 of nitrogen in the surface soil of Broadbalk wilderness and 0.131 p. 100 in that on Geescroft.

GARNER (1965) has described the recent history of the Broadbalk wilderness and JENKINSON (1971) has reported analyses on the soils of both sites from 1881 to 1964. The soils have become less dense with time and allowance has been made for this in sampling and analysis. From 1883 to 1964 the gain by the soil of an area of Broadbalk wilderness kept free from trees was at the rate of 55 kg N/ha annually. On the adjacent area where trees are allowed to grow the gain was 53 kg N/ha. The rate of gain on Geescroft wilderness is less than half as much ; the soil of Broadbalk wilderness is calcareous, the Geescroft soil is acid. By 1964 Broadbalk wilderness had gained more organic matter than had the soil of the plot of the wheat experiment which received 35 t/ha of FYM every year since 1843.

nitrogen in 1914; after a slight decrease due to fallowing to control weeds every fifth year from 1925, the value in 1944 was 0.24 p. 100 of nitrogen. On Hoosfield the soil under permanent barley which received farmyard manure every year contained 0.27 p. 100 of nitrogen in 1913 and this value was unchanged in 1946. Table 4 shows data for these two experiments.

TABLE 4

Total amounts of nitrogen in the soils of the Broadbalk wheat and Hoosfield barley experiments

(Percentage of total nitrogen in air-dry soil, 0-22 cm deep) (from WARREN, 1956)

Annual manuring	Broadbalk (wheat)		Hoosfield (barley)	
	1865	1944	1882	1946
None	0.105	0.106	0.098	0.103
NPK fertilizer	0.117	0.121	0.110	0.115
FYM	0.175	0.236	0.213	0.272
FYM from 1852-71 only	—	—	0.180	0.151

Woburn.

The continuous wheat and barley experiments were made on loamy sand soil which had 1.5 p. 100 organic carbon when the work began in 1876; this fell to about 1.0 p. 100 C by 1927 when fertilizing stopped. The fall has continued for the last half century and the lowest values are now about 0.56 p. 100 C on soils which received ammonium sulphate in the Classical period.

Systems involving grass, herbage crops and natural vegetation

When old arable land is laid down to grass, organic matter and nitrogen accumulate; conversely, when grassland is ploughed and arable crops are grown both are lost more quickly than crop residues replace them.

LAWES (1889) summarized the effects of grassland on soil fertility: 'When arable land is converted into meadow there is an increase in vegetable matter, carbon and nitrogen, and an accumulation of fertility within the soil... When, however, grassland is broken up and converted into arable, the accumulated fertility rapidly diminishes.'

Permanent grass.

RICHARDSON (1938) found at Rothamsted that when arable soil is put down to grass the per cent of total nitrogen in soil moved halfway from that characteristic of old arable to that characteristic of old grass in 25 years. He gave these approximate values for grassland of varying ages:

Similar results have been obtained in other countries. An early American summary by THORNE (1926) stated : 'By the use of chemicals alone it had been possible to maintain the yields of farm crops for periods of 20-30, 40 and 70 years on a parity with the yields from applications of farm manure containing much larger quantities of the essential chemical elements ... the outcome warranting the assumption that the larger root growth, which may be obtained as effectively from the elements in chemicals as from those in manure, furnishes all the organic carbon required for bacterial functioning. No artificial distribution of vegetation through the soil is so perfect as the natural growth of plant roots'.

Modern period

Comparisons of FYM and fertilizers have continued since the Classical experiments have been modified. Where modern varieties of cereals have been grown in rotation, and larger rates of nitrogen, herbicides, and up-to-date cultivations have been used for all crops, yields have increased dramatically. In recent years some yields have been larger on soils long-treated with FYM than on those given fertilizers both on Broadbalk (wheat) and on Barnfield (roots). These results will be described by JOHNSTON and MATTINGLY.

CHANGES IN THE NITROGEN AND ORGANIC MATTER IN SOILS

Inorganic nitrogen is ephemeral in soils ; crops take it up quickly or it is lost by leaching or denitrification. The longer lasting nitrogen fraction is combined with organic substances and the amounts depend on the past history of land. Changes in total nitrogen and total organic carbon in soils are usually parallel, with the ratio percentage C : percentage N around 10. Nitrogen accumulates where crop residues are ploughed in, organic manures are applied, or where grass or natural vegetation grows. The stock diminishes with continuous cultivation. The changes that take place have been monitored in many long-term field experiments.

Experiments on cereals

Rothamsted.

WARREN (1956) stated that the unmanured plots, and the plots receiving only PK fertilizers in the Broadbalk Wheat and the Hoosfield Barley experiments at Rothamsted, still contained about 0.10 p. 100 of nitrogen after a century of continuous cropping, and this value had been roughly constant for many years. Where a complete NPK fertilizer mixture had been applied annually the level of soil nitrogen (and therefore of organic matter) was a little higher, due to the extra nitrogen in the larger amounts of roots and stubble grown and ploughed in each year. In both experiments organic matter was built up rapidly in the early years by annual dressings of 35 t/ha of farmyard manure ; the Broadbalk FYM plot contained 0.25 p. 100 of

TABLE 3

Average yields given by annual dressings of farmyard manure and of NPK fertilizers in Classical Experiments at Saxmundham, Rothamsted and Woburn

Experiment began	Crop	Years used for yield comparisons	Average yields per hectare (kg or tonnes)		
			Without manure	With FYM	With NPK fertilizers
			Rotation I Experiment at Saxmundham		
1899	Wheat (kg)	1900-61	1,280	2,380	2,430
	Mangolds (t)	1906-61	10.5	43	45
	Barley (kg)	1900-61	1,030	2,030	2,260
	Beans (1) (kg)	1920-39	1,390	3,100	2,850
	Peas (1) with beans (kg)	1940-61	1,060	2,130	2,170
			Rothamsted Classical Experiments		
1876	Mangolds (t)	1941-59	3.8	22.3	29.4
1843	Wheat (kg)	1935-59	1,140	2,500	2,530
1852	Barley (kg)	1952-61	930	3,520	2,380
1856	Hay (2) (kg)	1920-59	1,640	4,420	4,440
			Woburn (3) Classical Experiments		
1877	Wheat (kg)	1877-96	950	1,800	2,000
	Barley (kg)		1,270	2,340	2,340

(1) Beans generally occupied the legume break from 1900-39, after that peas were often taken.

(2) Dressings of farmyard and of fish manure are applied on a cycle of 4 years in the hay experiment; 35 t/ha of FYM are applied in the first year of each cycle and fish meal supplying 63 kg N/ha in the third year.

(3) Yields for Woburn are for the first 20 years of the experiment; after that yields decreased where ammonium sulphate made the soil acid.

Summary.

If organic manures had large and specific effects on crops, because they were *organic*, these must have been demonstrated in these long-continued experiments; there were no signs of such effects. In most of the comparisons organic manures supplied more nutrients, and particularly more nitrogen and potassium, than the fertilizers tested; and yet fertilizers gave as good yields, or better than the organics in most tests. Only where the extra nutrients supplied were particularly important, did FYM give larger yields; examples are the legumes at *Saxmundham*, which probably benefited from the extra potassium supplied by FYM and the barley on Hoosfield where fertilizers supplied too little nitrogen. The effects of organic manuring in these experiments in the classical period seem to be explicable mainly in terms of the extra nutrients supplied. Nevertheless, most reports on these experiments described better soil structure and physical conditions, and the possibility of easier and earlier working to prepare a seedbed on plots treated continuously with FYM. It seems that these advantages were not easily translated into extra crop yields.

Classical period

Table 2 shows the rates of dressing used in the Classical experiments at Rothamsted, Woburn and Saxmundham and table 3 gives yields with NPK fertilizers and with FYM. On sandy clay loam at *Saxmundham*, only beans gave average yields greater with FYM than with NPK fertilizers, perhaps because the manure supplied more potassium. With other crops fertilizers were a little superior over the 60 year period, and particularly so for barley. Although the Saxmundham soil is difficult to work and is unstable when wet, and structure is better and the land works more easily and sooner where FYM is used, the manure seems only to have acted as a source of plant nutrients.

TABLE 2

Approximate annual rates of dressing used in the Rothamsted, Woburn and Saxmundham Classical Experiments

Fertilizers		N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
Rothamsted	Mangolds	96	34	224
	Wheat	145	34	90
	Barley	48	34	90
	Hay	48	34	224
	Farmyard manure (1) (35 t/ha)	185	37	168
Woburn (2)	Fertilizers	46	34	90
	Farmyard manure (20 t/ha)	118	19	56
Saxmundham	Fertilizers	38	17	52
	Farmyard manure (1) (15 t/ha)	87	17	83

(1) The FYM data for Rothamsted and Saxmundham are all based on analyses of samples used at Rothamsted in the last 25 years.

(2) At Woburn this manuring was used from 1877 to 1906.

Yields quoted in table 3 for *Rothamsted* are for recent periods since any superiority of organic manures may be expected to be greater the longer the experiment continues. On the clay loam and silt loam soils continuous complete fertilizer dressings out-yielded continuous dressings of farmyard manure for mangolds. For wheat and for hay the two kinds of manuring gave equal yields, while for barley FYM gave larger yields than fertilizers (probably because the fertilizer dressing supplied much less nitrogen than the crop needed). At *Woburn* fertilizers gave slightly larger yields than manure for wheat and the same yields of barley.

Grazed grassland

In most modern experiments with fertilizers on grass, yields have been assessed by hay or silage cuts, or by cutting shorter herbage to simulate grazing. Some short-term experiments have been done recently where yields of extra milk or beef have shown that the extra growth of grass caused by nitrogen fertilizer can also be measured in terms of extra animal product. None of the old fertilizer experiments that were done with grazing animals gave results that are applicable to modern conditions since the yields achieved were much less than are now expected. Only one experiment was long continued ; it is described below.

Tree Field, Cockle Park.

This experiment was also started by Professor SOMERVILLE in 1896 on heavy boulder clay to test fertilizers on poor grass grazed continuously by sheep. It was extended in a few plots on Hanging Leaves Field to grazing by cattle and sheep. Both experiments stopped in 1954. The trial and the results have been described by PAWSON (1960) and ARNOLD will give an account of the work to this Conference.

LONG-TERM COMPARISONS OF FERTILIZERS AND ORGANIC MANURES

Since fertilizers were first introduced there has been controversy between those who supported their use and those who thought organic manures to be superior. Although organic manures have been tested against fertilizers since experiments began at Rothamsted in 1843, it remains difficult to measure and interpret their effects on crop growth. Aggregation (stable crumb structure), and water-holding capacity of soils may be measured, as well as the rates at which air and water pass through. Such measurements on soils in the laboratory have little more than academic interest ; they only confirm the farmer's qualitative observations that soils drain better and work more easily when fully supplied with organic matter. The amounts of plant nutrients in organic matter and organic manures may be measured, but most of the nitrogen and phosphorus is released by microbial decay at rates that cannot predicted with certainty. The value of organic manures *to farmers* must be measured by field experiments on crops. By testing fertilizers at the same time, it is possible to estimate how much importance should be given to the nutrients supplied by the organic matter. Increases in crop yield given by organic matter, over and above the increases caused by the nutrients the manures supply, may be ascribed to all those other effects of which improved soil structure is an important component.

The most telling comparisons between fertilizers and FYM, so far as decline in soil productivity where manures are not used is concerned, were made in the old experiments on continuously-manured plots that were maintained for many years at a few centres. The results of some of this work which provide relevant data are summarized here.

EXPERIMENTS ON GRASSLAND

Grass cut for hay

Park Grass, Rothamsted.

The Park Grass plots, laid down in 1856 and described by WARREN and JOHNSTON (1964). are much the oldest surviving grassland experiment in the world. They demonstrate in a unique way how continued manuring with different fertilizers affects the botanical composition and yield of a mixed population of grasses, clovers and other species. The Park had already been in grass for several centuries when the experiment began. After more than 100 years, the boundaries of the plots are still sharp ; the transition between adjacent treatments occupies 30 cm or less, showing that there is little sideways movement of nutrients in undisturbed soil.

The plots have been cut each year for hay ; all are harvested at the same time, although no single date can be suitable for all plots. For a few years the aftermath was grazed by sheep penned on each plot. Since 1873 a second cut has been taken and carted green. Since 1960 yields have been calculated from the weights of produce from sample strips cut with a forage harvester (two or four per plot according to size). Subsamples are taken to estimate dry matter. At the first cutting the produce of the remainder of each plot is made into hay ; this allows the return of seeds to the soil as in the past. At the second cutting the whole produce is carted green. The results will be described to this Conference by THURSTON, WILLIAMS and JOHNSTON.

Palace Leas, Cockle Park.

This experiment, which still continues, was described by PAWSON (1960). It was begun in 1897 on a permanent meadow to study the effects of fertilizers on hay yield and quality. The results will be described by ARNOLD. Probably the work is best remembered because it provided the first long-term tests of basic slag and proved the value of this fertilizer for improving grassland on heavy soils.

Summary of the results

Before the end of the last century the Rothamsted experiment had shown :

(*i*) that large yields of grass can be obtained only if enough nitrogen is applied ;
(*ii*) that soil acidity caused by ammonium sulphate must be neutralised ;
(*iii*) that nitrogen fertilizer must be supported with adequate supplies of P and K to sustain production ;
(*iv*) the vital importance of K-fertilizers for clovers grown on Rothamsted soil.

On other kinds of soil at Cockle Park, and in shorter-term experiments at Saxmundham, results stressed the importance of phosphorus fertilizers, rather than potassium, for legumes ; experiments on both these sites showed the value of basic slag for improvement of grassland.

At Saxmundham all crops gave large responses to phosphate ; mangold yields were increased by P by 200 p. 100, beans and peas by 60 p. 100, and cereals by 40 p. 100. For cereals the response to nitrogen was as large as to phosphorus. Barley responded better than wheat, possibly because the wheat followed a legume. Mangolds gave less response to nitrogen than to phosphorus, and the response was small unless phosphate was also applied. The mangolds and cereals have given only small responses to potassium (about 5 p. 100) but legumes gave much larger responses (of about 25 p. 100) when phosphate was also given. FYM (15 t/ha) and the NPK fertilizer dressings used gave almost the same yields of wheat throughout the 60 years (the two treatments supplied almost the same amounts of immediately-available N, P and K). Initially the NPK-treated plots gave a somewhat greater yield of barley than FYM did ; the difference later became less. Mangolds also gave less with FYM than with NPK-fertilizer in the latter years. The experiment showed that on the sandy clay loam used, the FYM has acted as a source of plant nutrients, additional benefits from the organic matter it supplied have been small or non-existent. Yields however remained small because little nitrogen was applied and on plots without phosphate barley and sugar beet failed.

In 1966 the treatments were modified. The rate of nitrogen applied was increased and two amounts were tested from 1966-69 ; phosphate fertilizer was applied to plots which had previously received none. The same crops (wheat, sugar beet, barley and beans) were grown and yields increased to the average expected from this land. From 1970 PK manuring is unchanged but herbage crops have been grown to measure the rate at which the soil releases potassium ; it is also hoped that soil structure will be improved so that the problems with arable crops described by COOKE and WILLIAMS (1972) are overcome.

Rotation II experiment.

This was one of two experiments designed by Professor SOMERVILLE to see 'how farmyard manure and artificials might best be distributed over the crops of a rotation'. His purpose was to measure both direct effects and residual effects because the overall return to a farmer depended on the total yield of all crops in a rotation. On most farms in the last century a fairly definite amount of farmyard manure was available and a farmer had to see how it was best distributed over his land, and how profitable it was to supplement the FYM with fertilizers. The first experiment at Cockle Park (Northumberland) was started in 1897 ; the second was Rotation II at Saxmundham which began in 1899.

The Saxmundham experiment had tests involving different times for distributing fixed amounts of FYM and NP fertilizers to four crops of a rotation. All crops were grown in each year but no plot tested fertilizers alone. The results, described by BOYD and TRIST (1966), add nothing to the comparison made in Rotation I experiment in the same field which is described above. The Rotation II experiment was modified in 1965 to measure the value of the phosphate residues left in the soil by dressings of FYM and superphosphate given at intervals from 1899 onwards. The residues, valued for potatoes, sugar beet and barley, have been more effective than fresh dressings. Early results have been published by MATTINGLY, JOHNSTON and CHATER (1970) and the work will be described later in this Conference.

rates of dressing were not tested, the shapes of response curves could not be defined. The experiments were useful in indicating likely benefits from fertilizers, and they were used for constructing nutrient balance sheets for rotations. The legumes grown fixed nitrogen. but no provision was made in the design for the scale of fresh N-dressings that would have been needed to estimate the amount of nitrogen contributed to following crops.

Rothamsted

The Agdell experiment.

The Agdell experiment, described by WARREN (1958), began in 1848 and tested two crop rotations and three manuring treatments. In one cropping scheme swedes, barley, clover (or beans) and wheat were taken ; in the other scheme a fallow replaced the legume. The manuring treatments were none, PK, NPK ; they were applied once in four years to the swede crop. The later years of the experiment were spoiled because the crops on NPK-treated plots were affected by the soil becoming acid. Before this the two rotations gave similar yields of roots and cereals and the main advantage of the legume in rotation was the extra produce from beans or clover. There were large responses to the fertilizer treatments. Nitrogen increased the yields of swedes by 15-22 t/ha, and on the following crop of barley the residues of the nitrogen manures gave about 700 kg/ha more grain ; there was, however, no residual effect on wheat, which was the last crop after the application of the nitrogen.

The Agdell experiment was stopped in 1951. When it began it was relevant to the farming systems and manuring problems of the times, but such simple tests are not able to deal with the more complex problems of present-day farming. The site is, however, very useful for work on the value of the fertilizer residues in the soils. This work has been recorded by JOHNSTON and PENNY (1972) and will be discussed later by MATTINGLY and JOHNSTON.

Saxmundham

Rotation I experiment.

The oldest existing rotation experiment (described by TRIST and BOYD (1966)) began in 1899 at Saxmundham in Suffolk. It used the Norfolk Four-Course system and each crop was grown in each year. Eight fertilizer treatments applied for each crop are in a $2 \times 2 \times 2$ factorial arrangement ; from 1899 to 1965 they tested the presence and absence of N (36 kg N/ha), P (15 kgP/ha) and K (50 kg K/ha) ; 15 t/ha of FYM were also tested.

Rotation experiments, such as that done on Agdell field, where only one crop of the rotation received manures, and only one crop was grown in a season, are of little value under modern conditions. The Saxmundham experiment was a considerable improvement, all crops were grown in each year, each crop was manured, and the fertilizer tests were more comprehensive (except that the rates were small by modern standards). Information on the relative responsiveness of the crops grown is not complicated by differences between years and soils. Such experiments help in studying relationships between weather and crop yields, and also in investigating the effects of continuous cropping and manuring on nutrient reserves in soil.

series of micro-plot experiments superimposed on the large classical plots in 1957 and 1958, and fresh additions of P and K fertilizers were tested ; this work was described by WARREN and JOHNSTON (1960).

Woburn

Stackyard Field (wheat and barley).

The Royal Agricultural Society began their experiments in 1876 ; the early work was fully described by RUSSELL and VOELCKER (1936) and summarized by JOHNSTON (1975). An important purpose was to investigate the residual effects of manures made from purchased feeding stuffs, and of fertilizers. VOELCKER supervised the experiments for the Society and LAWES and GILBERT were associated with their design and conduct.

The continuous wheat experiment was first sown in autumn 1876 and the continuous barley in spring 1877. Cereals were grown each year until 1926 when manuring with PKNaMg stopped in the 50th year. The plots were laid out as in the Hoosfield barley experiment at Rothamsted. Strips with and without PKNaMg fertilizers were crossed by strips with and without N fertilizers ; FYM was tested on separate plots. Changes were made to the fertilizer dressings, particularly in 1907. In the early years yields of both crops were increased by N and by PK fertilizers. During the experiment soil acidity increased ; particularly where ammonium sulphate was applied, yields diminished and weeds increased. Liming improved yields. After 1926 P, K and FYM were not applied and in several years the plots were fallowed to control weeds. Little useful work was done on the experiments between 1926 and 1954 because soil acidity considerably decreased yields and encouraged the spread of weeds tolerant of the acid conditions. In retrospect it is easy to see that only small areas should have been kept acid to demonstrate the effects of acidity ; the rest of the land should have been limed. The soil was eventually limed in the 1950s and in 1960-62 the sites of the two experiments were used for micro-plot experiments to value the residues of P and K; from 1966 the land has been used for new experiments for which its small organic matter concentration is important.

SIMPLE ROTATION EXPERIMENTS

The early rotation experiments were too simple in design, and had too few plots to permit a full investigation of the cropping systems used. The problems involved in rotational cropping are, in fact, very difficult ; it is only since some older experiments have been modified, and new ones have been started, that some general principles that govern the effects of one crop on another have become clearer.

The few experiments started in Britain in the nineteenth century were based on the Norfolk Four-Course system of swedes, barley, clover (or beans) and wheat. Soil-borne diseases caused no problems, except where the soil became acid enough to encourage club root in swedes, as happened in the Agdell experiment at Rothamsted. The simple fertilizer tests used identified the need for extra nutrients ; but, as several

and die at the tips ; P deficiency sometimes produces a steely-blue tinge. Such symptoms, which soon disappear, are seldom shown by winter wheat on Broadbalk where differences of colour reflect only differences in supply of N. The present scheme of cropping and manuring was adopted in 1968 after a year's fallow to destroy persistent weeds.

Barnfield (root crops).

This experiment (described by WARREN and JOHNSTON (1962)) tested several kinds of nitrogen fertilizer (but at only one rate, 96 kg N/ha), and 35 t/ha of F.Y.M. as well as PKNaMg fertilizers. Roots for animal feeding were grown in most years from 1843 to 1959. Mangolds and sugar beet (grown from 1946 to 1959, when the cropping was changed) showed the importance of phosphorus and potassium fertilizers for the two crops when nitrogen is also given, and the value of the sodium supplied by sodium nitrate for these crops. NPK fertilizer gave larger average yields than FYM alone, but FYM plus nitrogen fertilizer gave still more yield. The experiment did not indicate the shapes of the N response curves, or suggest whether the yields were the maximum obtainable on this land. Although cyst nematodes were present in the soil at the end of the continuous cropping, they appeared not to have damaged sugar beet and mangolds seriously.

In recent years part of the field has grown beans and has provided important information on the interaction of simazine herbicide and the organic matter content of the soil. Where FYM had been applied for over 100 years simazine controlled weeds and did not damage beans, but on fertilizer-treated soil, containing much less organic matter, simazine damaged the crop.

The rest of the field has grown barley, wheat, potatoes and sugar beet in recent years. Yields of potatoes receiving FYM plus 144 kg N/ha have been greater than from fertilizers alone, even when 216 kg N/ha was applied with adequate P and K. The response curves suggest that potato yields grown with FYM cannot be equalled by fertilizers, however much NPK fertilizer is applied.

Exhaustion land (barley after wheat and potatoes).

This area was cropped with wheat without manure from 1852 to 1855 when it was divided into five strips for a fertilizer test with continuous wheat given treatments similar to some of those on Broadbalk. This continued till 1875 ; potatoes were then grown from 1876 to 1901 with the strips halved to test ten manurial treatments repeated on the plots each year. Three of these treatments were the same as were applied to the same plots under wheat.

The potato experiment ended in 1901, and from 1902 to 1922 the plots were cropped with cereals without any manure ; the yields of grain and straw were recorded in some years to measure the residual values of the manures applied to the potatoes. After 1922 cereal yields were not taken for many years, although differences between the plots were still visible. From 1941 onwards 63 kg N/ha as ammonium sulphate was given to every barley crop. This increased the yield and accentuated the visual effects of the former manuring. From 1949 yields of barley were again recorded and these showed a marked residual effect of the phosphate supplied by fertilizers or FYM *in the last century !* Residual effects of P and K on six crops were studied in a

With continuous wheat since 1952 the difference is small but after one-year fallow and after the two-year break (potatoes, beans) F.Y.M. has given about 0.5 t/ha more grain. The response curves show that more N applied in spring would not eliminate this difference.

The one-year fallow, introduced originally to control weeds, now acts mainly through lessening the inoculum of soil-borne fungi (especially the take-all fungus (*Gaeumannomyces graminis*), and by allowing the accumulation of nitrogen available to the following crop.

Other studies on Broadbalk have included work on micro-organisms in the soils, pests that attack the crops, and the weeds in wheat and in the recently-grown potatoes and beans. The soils of the plots are now in a stable condition and cultivations are changed as little as possible. The crops therefore offer especially good facilities for studying changes in yields, pests and diseases that are related to seasonal differences. Long-term studies on fungi causing root diseases, and on insect pests, have been made. The relation between yield and rainfall was studied by FISHER (1924) in the 1920s.

Hoosfield Barley.

This experiment initially included single plots treated annually with all combinations of :

1. None, superphosphate (P).
2. None, KNaMg (each as the sulphate).
3. No nitrogen, N as ammonium sulphate, N as sodium nitrate, N as rape cake (later castor meal) all at the same rate of N, together with an additional unmanured plot, a plot given F.Y.M. annually and a few others. This factorial scheme gave excellent information on the effects and interactions of the few factors included. The design of Hoos Barley is systematic ; the four combinations of factors (1) and (2) are applied to strips running east-west ; these were crossed by four 'series' running north-south, each receiving one of the nitrogen treatments. In 1862 a test of silicate was incorporated, without spoiling the design, by splitting the sodium nitrate plots into two.

The cropping of Hoos Barley has been more truly continuous than on Broadbalk or Barnfield ; in the 115 seasons 1852-1966 spring barley was grown 112 times ; in three years only the experiment was followed to control weeds. The early results were described by WARREN and JOHNSTON (1967). The later modifications made in 1968 and some recent results will be described in this Conference by JOHNSTON and MATTINGLY.

The movement of soil by cultivations has produced irregular growth in many plots, and the wide paths (uncropped since 1893) supplied P and Ca which improved the growth of barley for several metres. From 1955, when the plots were first limed, the crop has been more even within each plot, but on plots with acute deficiencies (especially of P) barley still grows much better at the edges.

The barley on plots with incomplete manuring usually shows symptoms of deficiencies when about 10 cm high. As with all cereals, shortage of N causes the whole plant to be pale ; the oldest leaves may turn yellow and die at the tips. K deficiency, especially obvious during dry springs, causes the early leaves to turn yellow

University of Newcastle). The farm is now about 230 ha. The experimental programme was directed by the Professor of Agriculture at Armstrong College (later King's College). The first Professor was William SOMERVILLE who designed and laid down the earliest classical experiments for the Technical Education Committee of the County Council. This arrangement between the County Council and the Department of Agriculture of King's College continued until the University took over the farm.

The well-known classical experiments on grassland were laid down on heavy clay soil over Boulder Clay. The grassland improvement experiment on Tree Field, grazed by sheep, was started by William Somerville in 1896. This work was later extended by Thomas MIDDLETON to larger plots on Hanging Leaves Field and there the grazing was by mixed stocking with cattle and sheep. The other well-known experiment was begun in 1897 by Somerville on Palace Leas Field ; the herbage was cut for hay, as on Park Grass at Rothamsted. The only arable experiment was on Backhouse Field, an area of sandy soil suited for arable crops ; the Classical Rotation experiment began there in 1897. There were 22 plots and as in the Rotation experiment at Rothamsted, only one crop of the four grown was taken in any one year.

All of the Cockle Park experiments lasted for more than 50 years. Only the Palace Leas experiment is still continued ; the others were stopped in 1954-55 when M. COOPER was Professor of Agriculture.

EXPERIMENTS ON ONE CROP

Rothamsted

Broadbalk Wheat

The first experimental crop was wheat sown in autumn 1843 and harvested in 1844. Every year since then wheat has been sown and harvested on all or part of the field. The treatments compared are organic manures (farmyard manure and rape cake, later replaced by castor bean meal) and inorganic fertilizers supplying the elements N, P, K, Na and Mg in various combinations. For the first few seasons the treatments varied somewhat but in 1852 a permanent scheme was established and this continued until 1967. Crop and soil samples were taken, many are still available and some have been used in recent investigations as 'pre-pollution' standards. The experiment was fully described by Rothamsted Experimental Station (1969).

Weeds have been a serious problem and in 1925 a new scheme was adopted to control them. Strips of the field crossing all the plots at right angles were bare fallowed, mainly in a five-year rotation of fallow with four successive crops of wheat. Now most weeds are controlled by chemical sprays but one section is kept without sprays.

Writing in 1847, LAWES stated that similar land in the neighbourhood farmed in a five-course rotation would yield about 1.5 t/ha of wheat. At present the plot that has received neither manure nor fertilizer since 1843 yields about 2.1 t/ha after continuous wheat, 2.8 t/ha after potatoes and beans. Where nutrients are plentifully supplied by farmyard manure (F.Y.M.) or fertilizers yields now average 5-6 t/ha, more than double the yield of the same treatments in the early years. These differences reflect the improved varieties, cultivations and control of pests and weeds that have been introduced on Broadbalk (and on English farms generally) in the last 130 years.

For most of the period of the experiment best yields from fertilizers (given by plots receiving PKNaMg and at least 96 kg N) were equal to those given by F.Y.M., but since the changes made in 1968 F.Y.M. has given more grain than fertilizers.

this period were still able to supply nearly the full needs of barley, wheat, sugar beet, swedes and kale but not of potatoes.

On Broadbalk and Hoos Barley, where the new schemes are expected to continue for many years, substantial areas remain in permanent wheat and barley respectively. In addition these cereals are being grown in rotation :

Broadbalk : potatoes, spring beans, winter wheat.
Hoos Barley : potatoes, spring beans, spring barley.

The main object of these changes, the most drastic since these experiments began, is to find what the traditional crops will yield on the differently-treated plots when soil-borne pests and diseases have been lessened by growing insusceptible crops for two or three years and how these yields compare with those of the adjacent plots under monoculture. The yields of the newly introduced potatoes and beans are also of value, especially because soil analysis shows that the accumulations and deficiencies of nutrients are different in the different experiments.

On Barnfield the modified cropping was not intended to be permanent ; one-fifth has carried continuous spring beans since 1967 and the remainder has followed the rotation potatoes, spring barley, sugar beet, spring wheat. A new, long-lasting scheme for Barnfield will start in 1977.

The other major change introduced in 1968, except on Park Grass, is the replacement of ammonium sulphate and sodium nitrate by a mixture of ammonium nitrate and calcium carbonate ('Nitro-Chalk'). Castor meal (except on one plot of Broadbalk) has been discontinued, but its residual value is assessed on Hoos Barley and Barnfield.

Woburn (Bedfordshire)

Experiments began on land owned by the DUKE of BEDFORD at Woburn in Bedfordshire in 1876, under the auspices of the Royal Agricultural Society of England ; they have been a part of the Rothamsted programme since 1926. Over most of the farm the soil is a sandy loam, differing greatly from the heavier soil at Rothamsted, and many of the problems in arable agriculture differ. Woburn still fulfils an original purpose, to duplicate experiments done at Rothamsted on a different soil type, but for many years work has also been done on problems especially important in light-land farming, such as acidity where lime is not replaced, nitrogen deficiency and poor soil structure because of little organic matter in the soil, and small water-holding capacity. The light soil allows rapid multiplication of nematodes, both the free-living and cyst-forming types. The farm now has many investigations on the damage caused by nematodes and on methods of control.

Of the many experiments done at Woburn in the last 100 years only those on wheat and barley were continued for 50 years ; they are briefly described later in this paper and more fully by JOHNSTON and MATTINGLY.

Saxmundham (Suffolk)

The East Suffolk County Council began experiments on permanent sites at Saxmundham in 1899. The work was continued from 1947 to 1964 by the National Agricultural Advisory Service, when the Experimental Station, now only 3 ha, was placed under Rothamsted's control. The sandy-clay soil is difficult to work ; well supplied with potassium but deficient in phosphorus, it is an excellent contrast with Rothamsted. The Station had two arable rotation experiments, continued since 1899, which complement corresponding Rothamsted experiments. Both are described later.

Rotation I experiment was modified in 1966 to test amounts of nitrogen and phosphorus appropriate to present-day manuring on a four-course rotation of wheat, sugar beet, barley and beans. This experiment is also used to measure the release of potassium from soils on plots given none since 1898. In 1970 the plots were sown with herbage crops which remove larger amounts of K from the soil than arable crops do. The effect of leys on the soil will also be measured. The experimental areas are under-drained and we have measured and analysed drainage water since 1967.

More than half of Rotation II was abandoned in 1958 ; the remaining plots have been retained and are now used to measure the value of phosphate residues in the soil.

Cockle Park (Northumberland)

Cockle Park Farm became the Northumberland County Experimental Station in 1896. It remained in charge of the County Council until 1947 when the lease was transferred to King's College (Newcastle), then part of the University of Durham (King's College later became the

Cockle Park

The soils used for the grassland experiments are typical of the poorly drained Boulder Clay land of South-east Northumberland. They are surface water gleys, generally of heavy clay-loam texture, and are slightly calcareous. They overly prismatic-structured clay loams to clays, typical of the Upper Boulder Clay which overlies Millstone Grit. On Tree Field rusty mottling is found near the surface and the soil is gleyed at 25-40 cm depth. The arable experiment on Backhouse Field was made on sandy loam soil where the Millstone Grit outcropped.

SITES OF CLASSICAL EXPERIMENTS

Rothamsted

Between 1843 and 1856 LAWES and GILBERT started nine long-term experiments ; some of the plot treatments were changed during the first few years and one experiment was abandoned in 1878, but when LAWES died in 1900 eight experiments were continuing more or less as originally planned. These are now called 'the Rothamsted Classical Experiments'. (This account is taken from the 'Guide' published by Rothamsted Experimental Station (1974).

Their main object was to measure the effects on crop yields of inorganic compounds containing nitrogen, phosphorus, potassium, sodium and magnesium, elements known to occur in considerable amounts in crops and farmyard manure, but whose separate actions as plant foods had not been systematically studied. The materials used were ammonium salts and sodium nitrate (as alternative sources of nitrogen), superphosphate (at first made by mixing bone ash and sulphuric acid for each experiment) and the sulphates of potassium, sodium and magnesium. Farmyard manure was also included in most of the experiments. The inorganic fertilizers were tested alone and in various combinations. Nitrogen was often applied at two or more different rates.

LAWES and GILBERT recorded the weights of all produce harvested from each plot, and samples were kept for chemical analysis. These results, together with details of the quantity and composition of each fertilizer applied, enabled a balance sheet for the major nutrients to be compiled for each plot, and analysis of soil samples showed whether nutrients accumulated or diminished in soil. The installation of drains (one to each plot) in the Broadbalk wheat experiment in 1849 allowed the losses of nitrogen by leaching into the subsoil to be estimated. No other large-scale field experiment in the world has this feature.

The classical experiments gave results of immediate value to farmers for planning their use of fertilizers and manures, but their value for this purpose diminished as the contrasted processes of depletion and enrichment of nutrients went on, progressively reinforcing the effect of each annual application of the manures. Until about 1939 the best yields obtained on each experiment were roughly equal to the average yields of the same crops as grown on English farms. Since the 1950s with better-yielding varieties and increased use of fertilizers English farm yields exceeded those of the classicals, until the recent modifications which included the use of modern varieties.

The classical experiments have been modified since Lawes's death, mainly in three periods. Sir Daniel HALL, in 1903-06, added a few plots to Broadbalk, Park Grass and Barnfield, mainly to test the combination NKNaMg (that is, all major nutrients except P) which was originally omitted from these experiments. Hall also started the first scheme of regular liming on Park Grass, the only classical experiment where increasing soil acidity was adversely affecting some plots. (The others were on old arable fields which had received the traditional heavy dressings of locally dug chalk, a practice not followed on grassland).

From 1957 several of the classical experiments were modified to value the effects of the annually repeated dressings of different combinations of nutrients. This was done by introducing new crops (often several crops grown side by side on each of the original plots, as on the Exhaustion Land, Barnfield and Agdell) and by subdividing the old plots to test new fertilizer treatments. These modifications, together with detailed analysis of the soil by several methods, gave much information on the value of the accumulated residues of the materials applied in the past.

On the Exhaustion Land, for instance, two of the annual treatments from 1856 to 1901 were superphosphate and farmyard manure. This was followed by 50 years of cereal cropping without manures, and the P residues from the superphosphate and the farmyard manure at the end of

TABLE I

Particle size distribution of the soils (0-25 cm) *used for Classical Experiments*

Site	Soil Series	Particle size distribution				$CaCO_3$ (%)
		2 000 — 200 μ	200 — 20 μ	20 — 2 μ	< 2 μ	
Rothamsted Broadbalk.	Batcombe	6.4	40.5	24.6	28.4	1.3
Woburn Stackyard	Cottenham	42.8	35.0	8.3	10.3	0.0
Saxmundham	Beccles	25.3	33.4	13.5	27.8	0.6
Cockle Park :						
Tree field		16.3	32.0	20.6	31.0	—
Palace Leas		17	31	18	33	—
Backhouse field		47	25	11	17	—

Rothamsted

The soil was described by LAWES (1847) in his first paper as 'a rather heavy loam resting on chalk' ; later descriptions emphasised that 'a subsoil of raw yellowish red clay, resting upon chalk, provides good natural drainage'. The Soil Survey of England and Wales has examined all the Rothamsted soils and AVERY and BULLOCK (1969) described those of Broadbalk in detail. Soils of the *Batcombe* Series occupy 90 p. 100 of the field ; they have greyish brown to brown, silty clay loam or clay loam upper horizons with many flints, passing into yellowish red or brown clay at less than 60 cm depth. Other variants have a flinty silt loam upper horizon.

Woburn

The soil on which the Classical experiments were made was developed in drift over Lower Greensand. It is classified as Cottenham Series and is a loamy sand. A sandy loam, the Stackyard Series, also occurs on the same field. Both soils have been described by CATT, KING and WEIR (1975).

Saxmundham

The site has been described by HODGE (1972). It is a sandy clay loam, of the Beccles Series (surface water gley), formed in Chalky Boulder Clay having surface layers which contain much sand. The surface soil contains a small reserve of calcium carbonate ; the Boulder Clay subsoils contain much $CaCO_3$. Drainage through the subsoil is slow and the field is under-drained by a mole and tile system.

faster and faster since 1940. Output per acre, and per man employed, have both increased greatly. These changes in efficiency have been brought about by many changes whose separate effects are not easy to estimate. Mechanical power has replaced traditional manual labour, new varieties of crops, modern herbicides, chemicals to control pests and diseases, and increased use of fertilizers, have all been important. Perhaps the greatest change has been in the speed with which the results of research on soils, crops and animals, and modern ideas of business management, have been applied to farming in the last 20-25 years.

The use of fertilizers increased rapidly in Britain from 1940 onwards and now they account for more than one-tenth of the total expenses of farmers (nearly £ 300 millions was spent on fertilizers in 1974-75). To secure the best return from these large sums we found it essential to have new information on the effects of fertilizers on soil fertility ; the long-term experiments in Britain demonstrated their importance by providing the long-continued contrasts of the effect of farming on soil which is essential in managing intensive agriculture. The founders of Rothamsted deserve great credit for their faith in continued experimentation which still provides facilities for new research to solve present-day problems. Less obvious, but just as important, is the credit they should have for their perspicacity in choosing experimental treatments that are still relevant to modern conditions.

Annual fertilizer experiments on farmers' fields are of little value for understanding the factors that contribute to the yields measured, because the physical, climatic and biological parameters involved are rarely understood, let alone measured. A comprehensive understanding of chemical and biological effects, in relation to soil type and cropping systems can only come from experiments continued on the same site for at least ten years and preferably much longer. The actual value of particular long-term experiments depends on the number and nature of the nutritional factors tested, on the choice of rotations to test different cropping systems, and on the measurements and observations that are made of changes in soil properties and on the incidence of the pests and diseases of crops. The older rotation experiments had no provision for testing factors other than the fertilizers or manures applied. For example, to estimate the nitrogen fixed by leguminous green manures or herbage crops which becomes available to later crops in the rotation needs a special test of N fertilizer in later years. Such tests have been built into experiments that have been planned recently, and it has been possible to explain the effects of particular crops on those that follow.

The following sections of this paper describe : 1° the histories of the four sites used in England for experiments that have continued for 50 or more years ; 2° the experiments, classified by cropping system ; 3° the information to aid modern agriculture which has been obtained from the experiments or their sites.

THE SOILS USED FOR THE EXPERIMENTS

The soils used for these long-term experiments are described briefly below and mechanical compositions are in table 1. Both descriptions and physical properties are approximate as the experiments cover large areas and sometimes two related soil series occur on one site.

purpose was to discover 'the characteristic requirements of the particular crop under investigation' ; they also stated that secondary objectives were to discover the needs of crops in rotation and the effects of treatments on botanical and chemical characteristics of the crops grown. They also wrote (in 1893) 'the chemical statistics of the soils of the plots upon which they (the crops) have been grown, must afford very important data for further study and elucidation'. This last sentence forecasts the very important part which the Rothamsted experiments have played in developing modern ideas on the control of soil fertility. The first experiments were those on root crops, begun in June 1843, and the famous Broadbalk Wheat experiment which was first sown in autumn 1843. The experiment on barley began in 1852 and that on grassland in 1856 ; both continue. The Four-Course Rotation experiment (Agdell Field) began in 1848 and continued for 100 years ; the plots are still used to measure residual effects of manures applied in the 100 years after 1848. Other experiments on oats, beans, clover and potatoes were continued for ten or more years. LAWES and GILBERT wrote that 'the earlier field experiments were commenced without any idea of long continuance, and it was only as the results obtained indicated the importance of such continuance that the plan eventually adopted was gradually developed'. In 1893 they had about 225 large plots occupying 16 ha in all under continuous experiments. A complete list of all the published work describing the results of these experiments is in HALL (1917).

The decision to continue these as long-term experiments was vitally important for the development of agricultural science. The immediate purpose — to indicate the needs of crops for major nutrients — was achieved in the early years of the experiments. But agriculture is a continuous process and growing of crops causes slow changes in soil properties which determine the success (or failure) of the system. For example, CROWTHER (1949) wrote : 'The more complicated effects of plants and animals on soil fertility cannot be... estimated merely by chemical or physical analyses. Both on theoretical and practical grounds much more attention must be given to the *critical experimental analysis in field trials* of the basic agricultural problems, of which none is older, more important and more difficult than interpreting the effects of plants and animals on the fertility of the soil.'

THE ROLE OF LONG-TERM EXPERIMENTS IN AIDING RECENT AGRICULTURAL DEVELOPMENTS

Experimentation on farm crops in other parts of the country was stimulated by the early Rothamsted results ; related work on crop nutrition also began in many other countries and a few long-term experiments were made which will be described in this Symposium. The improvement of soil productivity in Britain, resulting from the use of fertilizers by farmers who applied the results of the experiments, continued rapidly until development was crushed by the farming depression of the 1870s. From this time crop prices fell because it became possible to import food from the new lands being developed overseas more cheaply than it could be grown in England. The need for food in the 1939-45 War initiated a new period of agricultural development. Now we are deeply involved in a second agricultural revolution that has gone

The experiments that still continue have been modified to fit the cropping, manuring and husbandry to modern conditions. They provide unique standardized conditions for learning more about the effects of weather on crops and soils, and on the factors that control soil fertility. Of the experiments begun in the nineteenth century, those which still continue are likely to be useful at least until the year 2 000 A.D.

INTRODUCTION

The Norfolk Four-Course Rotation established over much of Britain by 1850 contained the spring and winter cereals and the fodder roots of earlier systems ; the fourth crop was clover which provided extra winter fodder and left a residue of nitrogen for other crops of the rotation. This farming system had these advantages :

1° The rotations minimised damage by those soil-borne pests and diseases that were encouraged by growing one crop frequently.

2° Nutrients were conserved by retaining farm wastes, by using farmyard manure (FYM) to best advantage, and usually by allowing only meat and grain to be sold from the farm.

3° Extra nutrients were introduced when possible by :

a) growing legumes (these provided extra N) ;

b) purchasing animal feeding stuffs, bones and other wastes.

Such systems were successful because the control of cropping and sales of produce conserved plant nutrients, and avoided some soil-borne crop diseases. Output was, however, limited by the amounts of plant nutrients circulating around the farm ; yields could only be increased by injecting *extra* plant nutrients into the system. The great contribution of the early work at Rothamsted was to discover how much of certain elements could be added to increase yields and to show that these could be applied as simple chemical salts.

In the early years of the nineteenth century chemistry had emerged as a science and J. B. LAWES, the owner of Rothamsted, was among those who applied his knowledge to examining the composition of plants, and to attempt to enhance their growth. In his early work in pots and small plots in the late 1830s he found that phosphates made soluble by treatment with acid increased crop growth ; from this work the manufacture of super-phosphate was developed and the patents taken out by LAWES in 1842 founded the world's fertilizer industry.

THE CLASSICAL EXPERIMENTS AT ROTHAMSTED

In 1843 J. H. GILBERT joined J. B. LAWES and the field experiments which have become 'Classical' were started in that year on a systematic basis on the large plots that we see today. The founders of Rothamsted described the early experiments (LAWES and GILBERT, 1895) saying 'the general plan of the field experiments has been to grow some of the most important crops of rotation, each separately, year after year for many years in succession on the same land, without manure, with farmyard manure, and with a great variety of chemical manures ; the same description of manure being, as a rule, applied year after year on the same plot'. Their main

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 503-536.

LONG-TERM FERTILIZER EXPERIMENTS IN ENGLAND : THE SIGNIFICANCE OF THEIR RESULTS FOR AGRICULTURAL SCIENCE AND FOR PRACTICAL FARMING

G. W. COOKE*

Formerly of Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Herts. AL5 2JQ (England)

SUMMARY

Long-term experiments have a special value for providing information to guide agricultural developments. Carefully conducted and fully recorded experiments, where the compositions of both soils and crops are determined, provide ideal conditions for measuring the effects of fertilizers and cropping systems on soil properties and productivity.

Experiments in England that lasted more than 50 years are described. There were six at Rothamsted, two at Woburn (Bedfordshire), two at Saxmundham (Suffolk) and four at Cockle Park (Northumberland). Four of the Rothamsted experiments and both at Woburn grew one crop only ; four other arable experiments followed the four-course rotation of wheat, roots, barley, legume. There were four experiments on permanent grass ; two were grazed and two were cut for hay.

The arable experiments on single crops showed how the crops grown responded to the fertilizers tested. They have subsequently been used to measure changes in soil reserves of nutrients and the cropping has now been changed to obtain information relevant to modern conditions. Rotation experiments where all four crops are grown each year can provide information needed in modern farming if amounts of fertilizers applied are appropriate. Experiments where only one crop is grown each year are less useful and those that were done have been modified or stopped.

The old grazing experiments could not provide information of the type now needed and they have stopped. Grassland experiments that are cut continue to provide useful information — even after 120 years of experimentation.

Recent work on long-term experiments that still exist is described ; it has provided information on these important topics :

1. Long-term comparisons of organic manures and fertilizers.
2. Changes in organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium reserves in soil resulting from cropping and manuring.
3. Nutrient balance sheets.
4. Release of nutrients from reserves in soils.
5. The value of residues of fertilizers and manures.
6. Balances of other major nutrients and of micronutrients in soils.
7. Calibrations and testing of soil analysis methods.
8. Effects of one crop on succeeding crops.

* Now at : Agricultural Research Council, 160, Great Portland Street, London WIN 6 DT

On constate en effet que les expérimentations au champ, du type qui nous occupe aujourd'hui, ont été surtout le fait de quelques pays industrialisés. Elles ont été poursuivies en nombre limité et ne représentent que des zones écologiques insuffisantes. Certaines ont été abandonnées. Quelles sont les raisons de cette situation ? On peut en citer quelques-unes :

— le manque d'intérêt des chercheurs pour des activités qui intéressent plusieurs générations et qui ne sont pas profitables pour leurs carrières ;

— la nécessité absolue d'un travail d'équipes pluridisciplinaires, intégrant les aspects phytosanitaires, équipes souvent délicates à constituer ;

— le coût élevé des opérations, en particulier en techniciens et main-d'œuvre ;

— la prise de conscience insuffisante des pouvoirs publics et des responsables de l'orientation de la politique de recherche en agriculture ;

— enfin les difficultés de différentes natures que nous aurons à évoquer, et les craintes des directeurs de Stations et Laboratoires, pour la permanence de leurs dispositifs.

Les communications de ce colloque mettent bien en évidence la richesse des informations quantitatives et qualitatives que nous fournissent les expériences de longue durée, leur intérêt pour la pratique et la politique agricoles. Les discussions et les conclusions devraient également servir de guide à nos collègues de tous les pays qui se sont contentés jusqu'ici d'expériences à très court terme dont les conclusions peuvent être dangereuses, et je pense en particulier aux pays en voie de développement dans des zones écologiques sensibles.

Il serait souhaitable également que notre colloque puisse attirer l'attention sur les devoirs qui sont les nôtres, sur ce dont nous disposons pour assumer la conservation de la fertilité des sols du globe terrestre et sur les moyens qu'il est obligatoire de mettre en œuvre pour y parvenir tout en poursuivant l'intensification nécessaire de la production agricole.

ALLOCUTION

G. DROUINEAU
Président du Comité Scientifique

Le colloque qui va nous réunir pendant trois jours à Grignon, doit honorer la mémoire de DEHÉRAIN et des agronomes du siècle dernier, qui ont eu la claire vision de la nécessité des expériences de longue durée. On sait que dans les années 1830, BOUSSINGAULT en France et LAWES en Angleterre avaient conçu les bases de l'expérimentation en matière de fertilisation. Elle se développa dans les décennies suivantes surtout à Rothamsted, puis à Grignon. Nos ancêtres avaient fait preuve de perspicacité et de courage ; leurs successeurs, peu nombreux, ont continué malgré les difficultés de ce genre d'entreprise. Notre réunion est une occasion de faire le point de la situation au niveau international en matière d'expériences agronomiques de très longue durée, au champ. Si le comité scientifique d'organisation a fixé une limite de cinquante ans pour la présentation des dispositifs, limite qui peut paraître arbitraire, c'est qu'il fallait faire une sélection pour un inventaire qui n'a d'ailleurs pas la prétention d'être exhaustif.

Nous sommes bien conscients que des expériences de durées plus courtes sont aussi pleines d'intérêt, mais l'avantage de considérer des cas extrêmes, est que ceux-ci permettent de bien mesurer les contraintes de ce genre d'opérations. Des expérimentations de quelques décennies pourront être évoquées au colloque au cours des interventions, et leur exploitation doit bénéficier des enseignements des plus anciennes.

L'intérêt des expériences de très longue durée est qu'elles fournissent des réponses à de nombreuses questions que se pose l'agronome, elles seules peuvent le faire, et le Dr COOKE les évoquera dans sa conférence inaugurale. Mais pour des raisons économiques ou phytosanitaires, les techniques agricoles évoluent, le matériel végétal change, les rotations sont modifiées.

Comment concilier la nécessité d'une observation fidèle des dispositions originelles avec l'évolution des pratiques agricoles et des questions posées ? Comment compléter éventuellement des dispositifs anciens ? Comment concevoir aujourd'hui de nouveaux dispositifs ?

Les résultats que vous nous apportez et qui sont disponibles dans les documents du colloque, représentent une masse considérable de données dont l'acquisition représente un lourd travail, mais leur analyse et leur interprétation ne devrait pas rebuter les chercheurs de notre temps qui disposent d'outils de calcul plus performants. Nous ne pouvons pas avoir la prétention de discuter en détail, dans le temps dont nous disposons, les résultats présentés, mais il sera d'un intérêt extrême de profiter de votre grande connaissance des problèmes spécifiques de l'expérimentation de longue durée, pour dégager des indications méthodologiques et faire ressortir les risques, les pièges, les difficultés, les moyens éventuels d'y remédier.

SÉANCE INAUGURALE
INAUGURAL SESSION

tefois que leur dimension n'entraîne que l'expérience occupe une surface considérable. Heureusement, il est possible d'économiser de la surface en limitant le nombre des répétitions ; celles-ci sont moins nécessaires dans ce genre d'expériences que dans les essais à court terme. En effet, la différenciation due aux effets cumulatifs domine très généralement la variabilité due au milieu, à condition que celui-ci soit raisonnablement homogène au départ.

Cependant, et c'est là un des mérites de ce type d'essais, il arrive que des problèmes non prévus dans le protocole expérimental, se manifestent. Il devient alors évident qu'il faut prolonger la durée de l'expérience pour pouvoir analyser les effets secondaires et il n'est plus possible alors de fixer une limite *a priori*.

Ces considérations conduisent aux réflexions suivantes qui constitueront la conclusion de cette introduction. Un programme d'expérimentation de longue durée doit être mûrement réfléchi et avoir pour objet la mise en évidence d'effets très fondamentaux. Chaque pays ne peut en prendre en compte qu'un assez petit nombre et c'est pourquoi il serait nécessaire de créer sur le plan international un comité chargé de proposer et de suivre les essais de longue durée qui sont indispensables.

Le Colloque réuni à Grignon met en lumière l'extrême intérêt d'une telle coopération, chaque pays pouvant offrir des conditions pédoclimatiques bien typées, ce qui permet les comparaisons nécessaires à l'extrapolation des résultats obtenus dans chaque site particulier.

Il sera d'autre part nécessaire d'associer de nombreux spécialistes au suivi de ces essais car plusieurs orateurs ont été amenés à regretter que d'autres disciplines n'aient pas eu la possibilité ou la volonté de s'intéresser à l'analyse des situations créées par la répétition d'actions de fertilisation. Cette remarque concerne d'une part les biologistes, d'autre part les physico-chimistes. Par exemple le fait d'avoir maintenu le même matériau à des pH différents de 3 unités pendant une cinquantaine d'années ou plus, a certainement dû provoquer une différenciation dans l'évolution géochimique des sols qu'il aurait été précieux de caractériser. Enfin, une simple confrontation des rendements et de quelques données complémentaires ne permettent certainement pas de dégager toutes les conclusions que l'on peut tirer de telles acquisitions. Il faudrait se livrer à une véritable analyse de système pour dégager tous les enseignements possibles des résultats acquis.

En définitive, on peut conclure que malgré les charges que constitue l'expérimentation de longue durée, il est certainement indispensable qu'il en existe quelques-unes dans le monde, et en particulier dans les milieux tropicaux où les évolutions seront probablement plus rapides qu'en pays tempérés. De telles expériences constituent une richesse au niveau de la communauté humaine et devraient de ce fait être coordonnées par une instance internationale placée sous l'égide de la F.A.O ou de l'U.N.E.S.C.O.

Quant à la durée de ces essais, certains d'entre eux devraient être considérés comme sans limite de temps de manière à ce que les effets à très long terme puissent être mis en évidence.

En définitive, le Colloque de Grignon, aura permis de révéler les faiblesses mais plus encore les richesses de telles entreprises.

p. o. / Le Comité Scientifique.

On enregistre alors une variation de la flore, parfois extrêmement spectaculaire et liée assez étroitement aux variations de pH. Bien entendu, la production se trouve affectée. Ces observations et ces mesures apportent alors des données très importantes pour les écologistes.

Ainsi en prolongeant les expériences, il est possible d'apporter des réponses particulièrement fiables en ce qui concerne l'efficacité de la fertilisation minérale. Mais ce qui est encore beaucoup plus important est que les comportements et les productions des cultures auxquelles cette fertilisation est appliquée, permettent également d'apporter des précisions concernant les causes de ce que l'on peut encore appeler la fatigue des sols et les possibilités de les éliminer.

Par exemple, après avoir épuisé les réserves d'un sol, on peut étudier les modalités de leur reconstitution en apportant au sol les éléments chimiques de sa fertilité.

On peut aussi, en prolongeant la durée des essais, s'assurer de l'existence des effets secondaires que la fertilisation pourrait faire courir aux cultures et à la qualité des aliments. L'ensemble des réponses apportées par les très nombreux essais présentés dans ce numéro des *Annales* montre que ces craintes ne sont pas fondées et il est tout à fait capital que dans un monde qui doit accroître sa production d'aliments, on soit assuré que l'un des facteurs essentiels de cette production, la fertilisation chimique convenablement utilisée, soit pratiquement sans danger pour la fertilité des sols ni pour la qualité des aliments.

Une dernière question peut se poser : pendant combien de temps faut-il poursuivre une expérience de longue durée ? Aussi riches que soient les résultats obtenus, existe-t-il un moment où pour des raisons diverses, l'essai ne puisse plus apporter de nouvelles informations ? Si on a très injustement parlé de musée ou de « cimetières américains » pour qualifier certains essais de longue durée, il est raisonnable de penser qu'ils doivent avoir une fin. Parmi les données qu'il faut envisager pour décider l'arrêt de telles expériences, il y a tout d'abord les accidents : nous n'insisterons pas sur des éventualités telles que les accidents survenus à un bâtiment voisin (incendie, explosion), ou au contraire la construction d'usines ou d'habitations. Mais il en est d'insidieux tels que, par exemple, la contamination d'une parcelle par une autre. C'est un cas qui a été étudié par l'un des rapporteurs. On peut y pallier en envisageant des parcelles de taille suffisante (de l'ordre de l'are) et leur séparation par des chemins suffisamment larges. Cette protection a toutefois l'inconvénient de créer des « effets de bordure ».

Mais il faut aussi envisager l'évolution des conditions générales de l'Agriculture ; par exemple, la création de variétés nouvelles des plantes mises en expérience, moins sensibles aux parasites, fait qu'une monoculture peut devenir acceptable alors qu'elle ne l'était pas avec des variétés sensibles.

Ce qui doit évidemment justifier la fin d'une expérience de longue durée c'est avant tout le fait que l'on a répondu aux questions que l'on s'était posées en établissant le protocole expérimental initial. Mais il est évident que cette condition peut être trop restrictive. Il peut y avoir intérêt lorsque le milieu a été différencié, à modifier le traitement des parcelles, par exemple en fertilisant une parcelle n'ayant pas reçu d'éléments fertilisants depuis un certain temps ou en introduisant un traitement fongicide dans une monoculture. Diverses modifications de cette nature sont évoquées dans les mémoires présentés dans ces annales. Par conséquent, les parcelles initiales doivent être d'une taille suffisante pour pouvoir être subdivisées sans tou-

tisme, des maladies, ou de l'infestation par les mauvaises herbes. De tels exemples figurent dans un assez grand nombre de rapports présentés lors du Colloque.

L'utilisation d'une rotation atténue ou supprime ces inconvénients suivant sa durée et la nature des végétaux cultivés. La vieille notion de « fatigue des sols », c'est-à-dire la diminution du rendement, en particulier en monoculture, impliquait la notion de repos, et le temps de repos correspondait à la durée nécessaire pour que la culture réintroduite sur le sol fournisse des rendements du même ordre de grandeur que ceux qu'elle fournissait avant qu'une détérioration du milieu, la fatigue, ne se manifeste. Il faut donc que la durée des rotations soit telle que le nombre d'années écoulées entre la réapparition de la même plante soit suffisante pour que le sol soit « reposé ». C'est dire que dans une expérience de longue durée, la rotation doit être particulièrement bien étudiée pour que la présence des parasites, des pathogènes, des plantes adventices ne risque pas d'affecter les rendements des parcelles recevant des apports d'éléments minéraux en quantité suffisante.

Dans la plupart des cas c'est grâce à l'utilisation d'une rotation qu'il est possible de poursuivre l'expérience pendant un temps suffisamment long pour mettre en évidence l'évolution des réserves du sol, de son état physique et de leurs influences sur le rendement des végétaux, sans que ces effets ne soient masqués ou modifiés par l'intervention des ennemis des cultures.

On trouvera parmi les communications plusieurs exemples d'une telle démarche, en particulier en ce qui concerne les macro-éléments (N, P, K). Mais il est curieux de constater qu'à part quelques exceptions concernant les méso-éléments (Mg...), il ne soit pratiquement pas fait état des problèmes posés par les éléments autres que les trois éléments précités. Il a été très peu question de l'évolution des propriétés physiques probablement parce qu'on ne dispose que de peu de méthodes permettant de les caractériser et que seuls quelques laboratoires spécialisés les utilisent.

Alors que les expériences de longue durée sont très intéressantes pour l'étude des bilans N, P et K dans les rotations, les données acquises sont encore insuffisantes pour préciser l'évolution des réserves du sol. Il en est de même pour ce qui concerne les effets comparés des fumures anciennes et des fumures nouvelles qui en sont la conséquence.

Par contre, on trouve d'assez nombreuses références concernant l'évolution des teneurs en matières organiques. C'est peut-être pour l'étude de ce problème que les expériences de longue durée sont les plus utiles. La vitesse de décomposition moyenne est faible et on ne mesure qu'une résultante de l'ordre de 1,5 p. 100 par an. D'autre part, les cultures, ne serait-ce que par leur racines et les chaumes, prennent une large part dans la restitution des matières organiques qui reconstituent le stock d'humus.

C'est le bilan annuel perte-restitution qui détermine la modification du stock. Étant donné les imprécisions dues en particulier à l'échantillonnage, il faut souvent plusieurs dizaines d'années pour établir les variations des teneurs d'une manière suffisamment précise pour qu'on puisse mettre en évidence les facteurs qui les déterminent. Plusieurs mémoires traitent de ce problème, du rôle des éléments fertilisants et particulièrement de N sur l'évolution du stock de matière organique et de la valeur C/N. Il est évident aussi qu'il faut une longue durée parfois de l'ordre du siècle pour qu'on atteigne de nouvelles teneurs stables correspondant aux valeurs asymptotiques calculables à partir des équations proposées pour représenter cette évolution.

Des expériences de longue durée ont été conduites avec une végétation prairiale.

La répétition de l'expérience, une autre année, sur le même type de sol, pourra donner des résultats très différents. C'est pour essayer de préciser les causes de ces variations que l'on doit associer au système traitement-réponse, une série d'informations complémentaires : caractéristiques physiques et chimiques du sol et leurs fluctuations saisonnières, climat de l'année, réponse du végétal, par des analyses chimiques et la mesure des composantes du rendement.

Dans les essais de longue durée si l'on ne peut expliquer complètement les processus intermédiaires, suivant la nature des facteurs ou des conditions mises en cause, on peut en amplifier les effets et dégager leur influence moyenne ; l'amortissement des variations annuelles augmente par exemple la sécurité des conclusions. Enfin, l'action prolongée d'un même traitement entraîne un effet cumulatif qui conduit à la différenciation de plus en plus prononcée d'un certain nombre de caractéristiques tant du sol que des végétaux.

On sait qu'il est difficile d'apprécier avec une certaine finesse la réserve en éléments fertilisants tels que P ou K et plus encore son efficacité, au moins dans certains sols. C'est en répétant des cultures sur des parcelles recevant des doses nulles ou croissantes de P ou de K qu'il est possible de montrer la nécessité de l'apport de ces éléments.

Par ailleurs, les parcelles se trouvant différenciées du fait des prélèvements des éléments nutritifs par les cultures et en modifiant l'importance des apports, on dispose de données qui permettent d'établir des références pour l'évaluation de la qualité des tests utilisés pour apprécier la fertilité chimique des sols.

L'expérience de longue durée est un moyen irremplaçable pour montrer à quelle vitesse et comment une succession de récoltes diminue la réserve au point que l'alimentation des végétaux cultivés devient insuffisante.

Mais d'autres effets non prévus par le protocole peuvent également apparaître tant en ce qui concerne la nutrition proprement dite, qu'en ce qui concerne les propriétés du sol.

Par exemple, la notion de réserve du sol ne s'applique pas qu'à l'élément mis en expérience. Si la fertilisation porte essentiellement sur N, P et K, nous savons que d'autres éléments sont aussi nécessaires et que ceux-ci sont également empruntés au sol. Il est important de savoir pendant combien de temps les réserves en éléments non pris en compte dans le protocole initial suffiront pour compenser les exportations par les récoltes, et là encore, seules les expérimentations d'une certaine durée sont susceptibles de nous renseigner.

Mais les résultats de telles expériences vont dépendre également des végétaux qui sont cultivés et de ce point de vue, on peut considérer deux cas très différents :

- utilisation du même végétal (monoculture) ;
- utilisation d'une succession de végétaux (rotation).

L'utilisation d'une monoculture a l'avantage de maintenir relativement constante, en fonction du temps, l'action exercée sur le sol par les végétaux. Le résultat est particulièrement intéressant quand on veut étudier les effets secondaires de la fertilisation minérale et en particulier son influence sur le milieu. C'est en effet sous les monocultures que l'état physique et l'état biologique sont les plus profondément modifiés soit en bien soit en mal. Il arrive souvent d'ailleurs qu'il faille, au bout de quelques années, interrompre l'essai, du fait du développement du parasi-

INTRODUCTION

Ce n'est pas la première fois que les *Annales agronomiques* publient des mises au point ou des résultats de Colloques. Il suffit de rappeler le numéro spécial sur la Pollution ou la publication des comptes rendus de la réunion concernant le Soufre. Mais il s'agissait soit de l'étude de phénomènes, soit de l'utilisation d'un élément fertilisant.

Les résultats publiés dans ce numéro concernent cette fois un aspect de la Méthode puisqu'il s'agit de mettre en évidence l'utilité des expériences de « longue durée » en matière de fertilisation, et les problèmes méthodologiques qu'elles posent.

On peut se demander quelles raisons justifient la prolongation d'un protocole expérimental, particulièrement à une époque où les techniques, les variétés évoluent très rapidement. De tels essais nécessitent des moyens importants et l'affectation de chercheurs. Or, les résultats ne pouvant être dégagés qu'après plusieurs dizaines d'années, cela signifie que les hommes qui y consacrent leur temps n'en tireront que partiellement les fruits, ce qui implique de leur part une certaine abnégation. Il est donc indispensable de s'interroger sur l'intérêt particulier que de tels essais peuvent avoir pour la connaissance fondamentale d'une part, et la technique d'autre part.

Pour répondre à ces questions, il faut prendre conscience tout d'abord des handicaps des expériences réalisées dans le milieu naturel et tout particulièrement en matière de fertilisation. Le chercheur intervient en différenciant une série de parcelles délimitées dans un champ, choisi aussi homogène que possible, et chacune des actions de différenciations constitue l'un des objets de l'expérience. Par exemple, on apporte ou on n'apporte pas tel élément fertilisant, seul ou associé à d'autres, ou bien on applique des doses croissantes de l'un d'eux.

Les plantes cultivées sont récoltées et les rendements sont comparés suivant par exemple des programmes impliquant la confrontation par couple des situations « avec » et « sans » l'élément considéré. Ce système de comparaison répond aux exigences de la Logique Formelle et ce sont ces exigences qui président à l'élaboration du plan de l'expérience, qui déterminent la structure des méthodes statistiques permettant d'évaluer de façon sûre les effets : c'est-à-dire les différences de production en quantité et qualité et leur signification. L'utilisation d'expériences anciennes est d'ailleurs rendue plus difficile car les dispositifs ne pouvaient tenir compte des exigences des méthodes statistiques de création récente.

La conclusion est du type : l'apport de tel élément appliqué à une ou plusieurs doses, seul ou associé à d'autres éléments fertilisants a produit une augmentation de rendement. Cette attitude est simpliste. En effet, on rapporte le résultat obtenu à un traitement, mais entre le fait d'apporter un élément fertilisant au sol, son absorption par le végétal, et l'incidence que cette absorption peut avoir sur le rendement, il existe toute une série de circonstances, une chaîne de processus qui sont généralement mal analysés.

TCHÉCOSLOVAQUIE.

BAIER J. — Institute of Plant Nutrition, Research Institute of Crop Production, 161 06 Praha 6, Ruzyně 507.

TUNISIE.

AOUNALLAH M. H. — Société Industrielle d'Acide Phosphorique et d'Engrais, 22, rue Pierre de Coubertin, Tunis.

KHAMMOUMA S. — Compagnie des Phosphates de Gafsa, 25, avenue Marcelin Berthelot, Tunis.

SIFAOUI A. — I.N.R.A.T., avenue de l'Indépendance, Ariana (Tunisie) et Consultant de l'Institut mondial du Phosphate, 8, rue de Penthièvre, 75008 Paris (France).

U. R. S. S.

DOSPEKHOV B. A. — Chaire Agriculture de l'Académie Agricole « Timiriazev », Moscou.

YAGOBINE B. A. — Institut « Prianishnikov », Moscou.

U. S. A.

WELCH L. F. — University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Agronomy, Urbana, Illinois 61801.

VON UEXKULL H. R. — Délégué de l'Institut de la Potasse à Berne, Suisse. Délégué de l'Institut de la Potasse à Atlanta. Director, East et S.E. Asia Programs, 126, Watten Estate Road, Singapore 11.

SQUALI A. — Ministère de l'Agriculture de la Réforme agraire, Direction de la Recherche Agronomique, B. P. 415, Rabat.

NORVÈGE.

LAG S. — Norsk Hydro a.s., Bygdøy allé, Oslo 2.

UHLEN G. — Agricultural University of Norway, Department of Soil Fertility and Management, Box 28, 1432 As-NLH.

NOUVELLE-ZÉLANDE.

GOULD M. D. — New Zealand High Commission, Haymarket, London SW 1Y, U.K. (Angleterre).

PAYS-BAS.

VAN BENTEN W. — Unie van Kunstmestfabrieken b.v. (U.K.F.), Maliebaan 81, Postbus 45, Utrecht.

LA LANDE CREMER L.-C.-N. (de). — Institute for soil fertility, Instituut Voor Bodemvruchtbaarheid, Oosterweg 92, Haren Gröningen.

BOSWIJK A. — Consulentschap Voor de Akkerbouw, Booslan 17, Emmen.

POLOGNE.

DOBRANSKI B. — Institut de Pédologie et de Chimie agricole, Académie Agronomique de Varsovie, ul. Rakowiecka 26-30, 02-528 Warszawa.

GORALSKI J. — Institut de Pédologie et de Chimie agricole, Académie Agronomique de Varsovie, ul. Rakowiecka 26-30, 02-528 Warszawa.

RÉPUBLIQUE FÉDÉRALE D'ALLEMAGNE (R. F. A.).

AMBERGER A. — Institut für Pflanzenernährung der TU München, 805 Freising-Weihenstephan.

JURGENS G. — B.A.S.F., Aktiengesellschaft, 6700 Ludwigshafen.

LANG H. — B.A.S.F., Aktiengesellschaft, 6700 Ludwigshafen.

SAALBACH E. — Ruhr-Stickstoff AG, Landwirtschaftliche Forschung Hanninghof, Hanninghof 35, 4408 Dulmen/Westf.

TIMMERMANN F. — Institut für Agrikulturchemie der Universität Göttingen, Von-Sieboldstrasse 6, 34 Göttingen.

ROYAUME-UNI DE GRANDE-BRETAGNE.

ARNOLD P. W. — The University of Newcastle upon Tyne, Department of Soil Science, Newcastle upon Tyne Nel 7RU, England.

CARPENTIER A. — The Sulphur Institute, 24-32 Kilburn High Road, Lynwood House, London NW6 5UJ, England.

COOKE G. W. — Agricultural Research Council, 160 Great Portland Street, London W1N 6DT England.

JOHNSTON A. E. — Rothamsted experimental station, Chemistry Department, Harpenden, Herts Al5 2JQ, England.

MATTINGLY G. E. G. — Rothamsted experimental station, Chemistry Department, Harpenden, Herts AL5 2JQ, England.

REITH G. W. S. — The Macaulay Institute for soil Research, Department of soil Fertility, Craigiebuckler, Aberdeen AB9 2QJ, Scotland.

THURSTON J. M. — Rothamsted experimental station, Botany Department, Harpenden, Herts AL5 2JQ, England.

SUÈDE.

JANSSON S. L. — University of Agriculture, Forestry and Veterinary medicine, S - 75007 Uppsala 7.

SUISSE.

BERGER J. — Centre d'Étude de l'Azote, Bleicherweg 33, CH 8002 Zurich.

INDRA F. — Lonza SA, Münchensteinerstr 38, Case Postale CH 4002 Bâle.

OTT P. — Aluminium Suisse S.A., Centre de Recherches, 8212 Neuhausen am Rheinfall.

PACCOLAT B. — Ugine Kuhlmann, Usine de Martigny, 4, rue des Vorziers, Ch 1920 Martigny.

VON PETER A. — International Potash Institute, P. O. Box 87, CH 3000 Berne 14.

VEZ A. — Station fédérale de Recherches agronomiques de Changins, CH 1260 Nyon.

BELGIQUE.

CLIPPEL R. (de). — A.B.I.P.A., Association Belge de l'Industrie des Produits azotés, Chaussée de Charleroi, 148, 1060 Bruxelles.

COTTENIE A. — Faculté des Sciences agronomiques, Université de l'État, Coupure Links 533, Gent.

CROHAIN A. — Station de Phytotechnie, 5800 Liroux-Gembloux.

DARCHEVILLE M. — Station de Chimie et de Physique agricoles, Chaussée de Wavre, 115, 5800 Gembloux.

ROUSSEL N. — Institut Belge pour l'Amélioration de la Betterave, Molenstraat, 45, 3300 Tienen (Tirlemont).

BULGARIE.

KADINOV B. — Ambassade de la République Populaire de Bulgarie, 1, avenue Rapp, 75007 Paris (France).

CANADA.

CESCAS M. P. — Université Laval, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Cité Universitaire, Québec, P. Q., G1K 7P4.

FOREST B. — Ministère de l'Agriculture du Québec, Service de la Recherche et de l'Enseignement, Complexe Scientifique, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, Québec.

TABI M. — Ministère de l'Agriculture du Québec, Service des sols, Complexe Scientifique, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, Québec.

COTE D'IVOIRE.

JADIN P. — I.F.C.C., Institut Français du Café, du Cacao et autres plantes stimulantes, B. P. 1827, Abidjan (République de Côte d'Ivoire).

SNOECK J. — I.F.C.C., Institut Français du Café, du Cacao et autres plantes stimulantes, B. P. 1827, Abidjan (République de Côte d'Ivoire).

DANEMARK.

DAM KOFOED A. — Askov Forsøgsstation, Skibelundvej 26, 6600 Vejen.

LINDHARD J. — Askov Forsøgsstation, Skibelundvej 26, 6600 Vejen.

ESPAGNE.

CANOVAS CUENCA J. — Centro de Capacitacion Agraria Torre Pacheco, Murcia.

CARDUS J. — Instituto de Edafologia y Biologia vegetal, Departamento de Barcelona, Facultad de Farmacia, Barcelona 14.

HERNANDO V. — Instituto de Edafologia y Biologia vegetal, Serrano, 115 *bis*, Madrid 6.

ÉTHIOPIE.

INDESHAW G. — Ministry of Agriculture, C.A.D.U., Chilalo Agricultural Development Unit, P. O. Box, Addis Ababa 3376, Assella 7.

FINLANDE.

KORKMAN J. — KEMIRA Oy, Malminkatu 30, Helsinki 10.

HONGRIE.

LATKOVICS I. — Research Institute for soil Science and Agricultural Chemistry of the Hungarian Academy of Sciences, Herman 0-15, H-1022 Budapest.

INDE.

— The Trustees, Surendranath College, 10 Puran Chand Nahar Avenue, Calcutta 13.

JAPON.

MATSUO H. — F.A.O., Soil Resources Development and Conservation, Service, AGL, via delle Terme di Caracalla, 0100 Rome (Italie).

MAROC.

AJANA M. — S.A.S.M.A., 70, allée des Jardins Aïn Sbaa, Casablanca.

CHRAIBI. — F.E.R.T.I.M.A. et Consultant de l'Institut mondial du Phosphate, 8, rue de Penthièvre, 75008 Paris.

MARÉCHAL C. — Fédération nationale de l'Industrie des engrais (F.N.I.E.), Département Études et Développement, 58, avenue Kléber, 75784 Paris, Cedex 16.

MEYRELES-TORRES C. A. — Centre international des Étudiants et Stagiaires, Fertilisation des plantes, 38, avenue de la Motte Picquet, 75007 Paris.

MÉRIAUX S. Mme. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), 149, rue de Grenelle, 75007 Paris.

MÉRIAUX D. — Centre technique du Génie rural des Eaux et des Forêts, Groupement d'Antony, Parc de Tourvoie, 92160 Antony.

MOREL R. — Institut national agronomique (I.N.A.), Centre de Grignon, 78850 Thiverval-Grignon.

PASSARIS S. Mme. — Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, F.S.E., 54, boulevard Raspail, 75006 Paris.

PÈLEGRIN P. — C.E.N. Cadarache, Service de Radioagronomie, B. P. 1, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance.

PÉQUIGNOT. — Rue de Versailles, 78340 Les Clayes-sous-Bois.

POULAIN J.-F. — Institut de Recherches agronomiques tropicales et des Cultures Vivrières, B. P. 596, Ouagadougou, Haute-Volta.

RABOUILLE B. — RENO EPC, 251, boulevard Péreire, 75852 Paris, Cedex 7.

RÉCAMIER A. — S.E.I. Grignon, 78850 Thiverval-Grignon.

RICHARD L. — Institut de Recherches du Coton et des Textiles exotiques (I.R.C.T.), Division Agronomie, 34, rue des Renaudes, 75017 Paris.

RIVET. — Générale des Engrais S.A., B. P. 122, 47, rue de Villiers, 92527 Neuilly-sur-Seine.

ROCHE P. — G.E.R.D.A.T., B. P. 5035, 34032 Montpellier, Cedex et Consultant de l'Institut mondial du Phosphate, 8, rue de Penthièvre, 75008 Paris.

SCOUPE C. — Société commerciale des Potasses et de l'Azote (S.C.P.A.), 62-68, rue Jeanne d'Arc, 75646 Paris (13e).

SÉVERAC R. — C.T.G.R.E.F., B. P. 92, 13603 Aix-en-Provence.

SOYER J.-P. — Station d'Agronomie, La Grande Ferrade, 33140 Pont-de-la-Maye.

STUDER R. — Institut national de la Recherche agronomique, Station d'Agronomie de Châteauroux, 30, rue Vieille Prison, 36000 Châteauroux.

SWIETLIK G. — Institut technique Français de la Betterave industrielle, 45, rue de Naples, 75008 Paris.

TALINEAU J.-C. — Office de la Recherche scientifique et technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.), 24, rue Bayard, 75008 Paris.

THÉVENET G. — Laboratoire Agronomique, 1, avenue Victor Hugo, 78440 Gargenville.

TRÉBOUS B. — Compagnie Française B.A.S.F., 140, rue Jules Guesde, B. P. 118, 92303 Levallois.

TROCMÉ S. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Route de Saint-Cyr 78000 Versailles.

VICARIOT F. — Office de la Recherche scientifique et technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.), 24, rue Bayard, 75008 Paris.

LISTE DES PARTICIPANTS

Étrangers

AFRIQUE DU SUD.

THOMAS. — Ambassade d'Afrique du Sud, 59, quai d'Orsay, 75007 Paris.

ALGÉRIE.

BERRAHIL A. — A.L.R.I.D., Société Algérienne de Réalisation d'Infrastructure de distribution, 31, rue Abbou Nouas, Hydra Alger.

AUTRICHE.

RUCKENBAUER P. — Institute for Crop Husbandry and Plant Breeding, Gregor Mendelstrasse, 33, 1180 Wien/Osterreich.

COPPENET M. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Station d'Agronomie de Quimper, rue de Stang-Vihan, 29000 Quimper.

DECROUX J. — Société commerciale des potasses et de l'azote (S.C.P.A.), 132, route d'Espagne, 31053 Toulouse, Cedex.

DESVIGNES P. — Institut Technique des céréales et des fourrages (I.T.C.F.), Ferme expérimentale de Boigneville 91720 Maisse.

DROUINEAU. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), 149, rue de Grenelle, 75007 Paris.

DUMAS Y. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Station d'Agronomie, Centre I.N.R.A., Antilles-Guyane, Domaine Duclos, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe.

FARDEAU J.-C. — C.E.N. Cadarache, Service de Radioagronomie, B. P. 1, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance.

FOURCASSIÉ F. — Société commerciale des potasses et de l'azote (S.C.P.A.), 132, route d'Espagne, 31053 Toulouse, Cedex.

FRANC M. — Ministère de la coopération, E.N.S.A. à Yaoundé, Cameroun.

GACHON L. — Institut national de la Recherche agronomique, Station d'Agronomie I.N.R.A., Domaine de Mondésir, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand.

GAUTIER P. — Centre de Recherches et d'Applications agronomiques, 182, avenue Aristide Briand, 92160 Antony.

GERVY R. — Fédération nationale de l'Industrie des engrais (F.N.I.E.), Département Études et Développement, 58, avenue Kléber, 75784 Paris, Cedex 16.

GOUÈRE A. — Société nationale pour la vente des Scories Thomas (S.N.S.T.), 60-62, rue de Ponthieu, 75008 Paris.

GOUNY P. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Station de Science du sol, Domaine de Saint-Paul, 84140 Montfavet.

GRIÈRE L. — RENO EPC, 251, boulevard Péreire, 75852 Paris, Cedex 17 et Consultant de l'Institut mondial du Phosphate, 8, rue de Penthièvre, 75008 Paris.

GRIMALDI J.-B. — Chambre syndicale des engrais composés, 58, avenue Kléber, 75016 Paris.

GROSSET-GRANGE Y. — Chambre d'agriculture du Loir-et-Cher, S.U.A.D., 15, avenue de Vendôme, 41000 Blois.

LA GUÉRONNIÈRE (de). — Générale des engrais S.A., B. P. 122, 47, rue de Villiers, 92527 Neuilly-sur-Seine.

HAINNEAUX G. — Office de la Recherche scientifique et technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.), 24, rue Bayard, 75008 Paris.

HAUT R. — C d F, Chimie, Agence de Lille, Division Techniques Agricoles, 11, rue du Palais Rihour, 59000 Lille.

HÉBERT J. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Station d'Agronomie de Laon, rue Fernand-Christ, 02000 Laon.

HÉNIN S. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.

HUET P. — Institut national agronomique Paris-Grignon (I.N.A.), Centre de Grignon, 78850 Thiverval-Grignon.

HUNZINGER J. — C.E.T.I.O.M., Bureau Régional Développement Nord-Est, 13-15, rue du Châtelet, 71000 Châlon-sur-Saône.

IGNAZI J.-C. — Générale des engrais S.A. (G.E.S.A.), 47, rue de Villiers, B. P. 122, Service Agronomique, 92527 Neuilly-sur-Seine.

JACQUIN F. — École nationale supérieure d'Agriculture et des Industries Alimentaires (E.N.S.A.I.A.), 30 *bis*, rue Sainte-Catherine, 54000 Nancy.

KABBAJ M. — Institut mondial du Phosphate, 8, rue de Penthièvre, 75008 Paris.

LANGLET B. — Institut technique des Céréales et des Fourrages (I.T.C.F.), Station expérimentale de Boigneville, 91720 Maisse.

LE BUANEC B. — Limagrain, Département Agronomie, B. P. 51, 63360 Gerzat.

LEFÈVRE G. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Station d'Agronomie d'Amiens, 23, rue Debray, 80000 Amiens.

LOUÉ A. — Société commerciale des Potasses et de l'Azote (S.C.P.A.), 2, place du Général de Gaulle, 68053 Mulhouse, Cedex.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 487-491.

Colloque international de Grignon

6-7-8 juillet 1976

LISTE DES PARTICIPANTS

France et Outre-Mer

ADMONT P. H. — Compagnie Française de l'azote (C.O.F.A.Z.), 4, avenue Vélasquez, B. P. 198-08, 75361 Paris, Cedex 08.

ANDRÉ P. — Compagnie d'Aménagement des coteaux de Gascogne, Chemin de l'Alète, 65000 Tarbes.

ANSTETT A. — École nationale Supérieure d'Horticulture (E.N.S.H.), 4, rue Hardy, 78000 Versailles.

ARRIVETS J. — Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières, Mission I.R.A.T. à Madagascar, B. P. 853, Tananarive, République Démocratique Malgache.

AUBERT G. — Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.), Services Scientifiques Centraux, 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy.

AUGÉ G. — Générale des Engrais S.A. (G.E.S.A.), 38, avenue Gaillardin, 45200 Montargis.

BIGARD J. Mme. — S.C. Darbonne, 91450 Milly-la-Forêt.

BLANC D. Mme. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Station d'Agronomie et de Physiologie Végétale, 45, boulevard du Cap, B. P. 78, 06602 Antibes.

BLANCHET R. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Station d'Agronomie de Toulouse, Chemin de Borde-Rouge, B. P. 12, 31320 Castanet-Tolosan.

BARÈGE J. — Société Commerciale des potasses et de l'azote (S.C.P.A.), Direction Régionale Nord-Ouest, 648, chemin de la Brétèque, B. P. 18, 76230 Bois-Guillaume.

BOYELDIEU J. — Institut national agronomique Paris-Grignon (I.N.A.), Centre de Grignon, 78850 Thiverval-Grignon.

BONIFACE R. Mme. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Station de Science du sol, Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.

BRICHETEAU J. — École nationale ingénieurs Travaux Agricoles, option Horticulture (E.N.I.T.A.H.), rue le Nôtre, 49045 Angers, Cedex.

BUSCH J. — Fédération nationale de l'Industrie des engrais (F.N.I.E.), Département Études et Développement, 58, avenue Kléber, 75784 Paris, Cedex 16.

CABIROL J.-L. — École supérieure d'Agriculture de Purpan, 271, avenue de Grande-Bretagne, 31003 Toulouse.

CARIOU. — Société nationale pour la vente des Scories Thomas (S.N.S.T.), 60-62, rue de Ponthieu, 75008 Paris.

CARPENTIER L. J. — I.S.M.A. Ltd, 1, avenue Franklin D. Roosevelt, 75008 Paris.

CASALIS P. — Compagnie Française de l'azote (C.O.F.A.Z.), 4, avenue Vélasquez, B. P. 198-08, 75361 Paris, Cedex 08.

CHEVALIER. — Société commerciale des potasses et de l'azote (S.C.P.A.), Centre de Recherche d'Aspach, 68130 Aspach.

CHEVREAU B. — Institut de Recherches agronomiques tropicales et des Cultures Vivrières, Station Expérimentale d'Awassa, Éthiopie.

CONESA A. — Institut national de la Recherche agronomique (I.N.R.A.), Station d'Agronomie de Colmar, 28, rue de Herrlisheim, 68000 Colmar.

Interventions — Contributions

Boyeldieu J., Huet Ph. — Comportement variétal et conduite du blé tendre en monoculture de longue durée 969
Varietal behaviour and long-term monoculture of wheat.

Gautier Ph. — Vingt-six années de contrôle alimentaire d'un verger de pommiers 983
Twenty six years of nutrition survey in an orchard of apple-tree.

Grière L. — Quelques données sur les essais de longue durée réalisés à l'Université de Pennsylvanie (The Jordan Soil fertility plots) et à l'Université du Missouri (Sanbornfield Columbia) 989
Data on long-term fertilizer experiments established in the Universities of Pennsylvania (the Jordan soil fertility plots) and Missouri (Sanbornfield Columbia).

Discussion générale — General discussion 999

5e séance — 5th session

Communications sur les essais de longue durée sur prairies
Papers on long-term trials on grass

Président de séance : Pr S. Hénin.

Lande Cremer (de la) L. C. N. — Expérience de fertilisation minérale et organique sur prairie permanente. Ile d'Ameland (1899-1969) 1007
Mineral and organic fertilizer experiment on permanent grassland, Island of Ameland (1899-1969).

Arnold P. W., Hunter F., Gonzalez-Fernandez P. — Long-term grassland experiments at Cockle Park 1027
Expériences de longue durée sur pâturages à Cockle Park.

Thurston J. M., Williams E. D., Johnston A. E. — Modern developments in an experiment on permanent grassland started in 1856 : Effects of fertilizers and lime on botanical composition and crop and soil analyses 1043
Observations récentes concernant un essai sur prairie permanente établi en 1856 : Effets des engrais et du chaulage sur la composition botanique, les récoltes et les analyses du sol.

Discussion générale — General discussion 1083

Conclusions

LANDE CREMER (de la) L. C. N. — Étude de l'entretien de l'humus en sol nu ou cultivé avec ou sans fumier (Gröningen-Haren, 1910-1970) 791
Study of the humus maintenance in bare or cultivated soil with or without farmyard application (Gröningen-Haren, 1910-1970).

STEINECK O., RUCKENBAUER P. — Results of a 70 years long-term rotation and fertilization experiment in the main cereal growing area of Austria 803
Resultats d'un essai de rotation et de fertilisation de longue durée (70 ans) dans la principale région de production céréalière de l'Autriche.

INTERVENTIONS — CONTRIBUTIONS

BEHAEGHE T., COTTENIE A. — Aspects botaniques et analytiques de l'évolution à longue échéance de l'état nutritif du sol 819
Botanical and analytical aspects of the long-term evolution of soil nutritive state.

DISCUSSION GÉNÉRALE — GENERAL DISCUSSION 831

4e SÉANCE — 4th SESSION

1° COMMUNICATIONS SUR LES ESSAIS DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE INTÉRESSANT LES ROTATIONS DE CULTURE
1st PAPERS ON LONG-TERM FERTILIZER TRIALS CONCERNING CROP ROTATIONS

Président de séance : Pr A. AMBERGER.

LALOUX R., POELAERT J., FALISSE A. — Étude de la fertilisation minérale sur des parcelles où monocultures et rotations culturales se sont succédé 839
Study of mineral fertilization on plots successively put to monocultures and crop rotations.

MOREL R., CHABOUIS Catherine, BOURGEOIS S. — Quelques résultats expérimentaux obtenus sur le champ Dehérain 855
Some experimental results obtained on Dehérain's Field.

WELCH L. F. — The Morrow plots. — Hundred years of research 881
Les parcelles « Morrow ». Cent ans de recherches.

CESCAS M. P. — Rate of rock phosphate disappearence for the Morrow plots 891
Évolution du phosphate naturel appliqué aux parcelles Morrow.

2° COMMUNICATIONS SUR LES ESSAIS DE LONGUE DURÉE INTÉRESSANT DES MONOCULTURES
2nd PAPERS ON LONG-TERM TRIALS CONCERNING MONOCULTURE

JOHNSTON A. E., MATTINGLY G. E. G. — Experiments on the continuous growth of arable crops at Rothamsted and Woburn experimental stations : Effects of treatments on crop yields and soil analyses and recent modifications in purpose and design 927
Expériences de fertilisation de longue durée sur monoculture dans les Stations expérimentales de Rothamsted et de Woburn : Effets des traitements sur les rendements et l'analyse des sols, et but et plan des modifications introduites récemment.

MATSUO H., HAYASE T., YOKOI H., ONIKURA Y. — Results of long-term fertilizer experiments on paddy rice in Japan 957
Résultats d'essais de fertilisation de longue durée sur riz au Japon.

DAM KOFOED A., NEMMING O. — Askov 1894 : Fertilizers and manure on sandy and loamy soils 583
Askov 1894 : Engrais minéraux et fumier sur sols sableux et limoneux.

LINDHARD J. — Askov 1894 : Investigations on displacement of applied fertilizers following soil preparations 611
Askov 1894 : Recherches sur le déplacement des engrais après préparations du sol.

DOBRANSKY B. — The application of mineral and organic fertilizers on two crop rotations (Pologne-Skierniewice 1923) 625
Utilisation d'engrais minéraux et organiques sur deux rotations de culture (Poland-Skierniewice 1923).

AMBERGER A., GUTSER R. — Effect of long-term potassium fertilization on crops and potassium dynamics of a brown earth (Weihenstephan) 643
Effet d'une fertilisation potassique de longue durée sur les récoltes et sur la dynamique du potassium dans un sol brun (Weihenstephan).

INTERVENTIONS — CONTRIBUTIONS

BAIER J., KRISTAN F., STRNAD P., JELINEK K. — The effect of long-term fertilization under different ecological conditions on spring barley and red clover yields 659
Résultats d'essais de fumure de longue durée en différentes conditions culturales sur les rendements de l'orge de printemps et du trèfle rouge.

JÜRGENS G., LANG H. — Essai de fertilisation de longue durée sur sables limoneux riches en acide phosphorique en climat peu pluvieux du Palatinat (résultats de 1938 à 1975). 665
Long-term fertilizer trial on phosphate-rich loamy sand in the low rain fall area of the Palatinate (results of trial from 1938 to 1975).

DISCUSSION GÉNÉRALE — GENERAL DISCUSSION 697

3e SÉANCE — 3rd SESSION

COMMUNICATIONS SUR LES ESSAIS DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE INTÉRESSANT LES ROTATIONS DE CULTURE

PAPERS ON LONG-TERM FERTILIZATION TRIALS CONCERNING CROP ROTATIONS

Président de séance : Pr A. Dam KOFOED.

TIMMERMANN F., WELTE E. — Effets de la fumure sur les rendements et l'absorption des éléments minéraux par les cultures dans l'essai à long terme du champ « E » de Göttingen. Effects of fertilizers on yields and nutrient uptake by crops in the long-term experiment « Göttingen E-Field » 703

WELTE E., TIMMERMANN F. — Fertilité du sol et bilan de l'azote dans l'essai permanent de fumure « Ewiger Roggenbau » (culture continue de Seigle) à Halle/Saale 721
Soil fertility and nitrogen balance in the long-term fertilizer experiment « Ewiger Roggenbau » (continuous growth of Rye) at Halle/Saale.

MATTINGLY G. E. G., JOHNSTON A. E. — Long-term rotation experiments at Rothamsted and Saxmundham experimental stations : the effect of treatments on crop yields and soil analysis and recent modifications in purpose and design 743
Expériences de fertilisation de longue durée sur rotations de cultures dans les Stations expérimentales de Rothamsted et Saxmundham : Effets des traitements sur les rendements et l'analyse des sols et but et plan des modifications introduites récemment.

BOSWIJK A. — The effect of fertilizers on the yield of industrial potatoes in an intensive cropping plan on sandy peat 771
Effet des engrais sur le rendement de la pomme de terre industrielle en culture intensive sur tourbe sableuse.

LANDE CREMER (de la) L. C. N. — Étude comparée des effets du fumier de ferme et des engrais minéraux sur sol sablonneux « détourbé » (Sappemeer, 1881-1934) 781
Comparison of the effects of farmyard and mineral fertilizers on a sandy « reclaimed peat » soil (Sappemeer, 1881-1934).

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 483-486.

TABLE DES MATIÈRES
CONTENTS

Liste des participants 487
Introduction 493
Allocution de M. Drouineau 501

Séance inaugurale — Inaugural session
Conférence générale d'ouverture — General opening lecture

Cooke G. W. — Long-term fertilizer experiments in England :
The significance of their results for agricultural science and for practical farming..... 503
Essais d'engrais de longue durée en Angleterre :
Importance des résultats obtenus pour les sciences agricoles et la pratique.

1re séance — 1st session
Intervention des pays nordiques
Contributions from northern countries

Président de séance : M. G. Drouineau.

Korkman J. — Long-term fertilization with phosphorus and potassium on a carex-peat soil in Southern Finland 539
Essai de fertilisation phosphatée et potassique de longue durée en sol de tourbe à Carex du Sud de la Finlande.

Uhlen G. — Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers and farm manure in long-term experiments with rotational crops in Norway..... 547
Effets des engrais azotés et potassiques et du fumier de ferme dans les essais de longue durée avec successions de cultures en Norvège.

Discussion générale — General discussion 563

2e séance — 2nd session
Communication sur les essais de fertilisation de longue durée intéressant les rotations de culture
Papers on long-term fertilizer trials concerning crop rotations

Président de séance : Pr G. W. Cooke.

Morel R. — Utilisation des résultats obtenus sur des essais de longue durée dans l'étude des transferts de l'azote dans le sol 567
Utilization of the results of long-term experiments in the study of nitrogen transfers in soil.

THÈME ET BUTS DU COLLOQUE
THEME AND OBJECT

Organisé à l'occasion du centenaire du dispositif expérimental mis en place par DEHÉRAIN en 1875, ce colloque a principalement pour objet d'analyser les résultats des essais de fertilisation d'une durée supérieure à cinquante ans qui ont été recensés et d'en tirer les enseignements suivants :

— intérêt et motivations scientifiques ;
— effets sur le sol et les végétaux ;
— conduite et interprétation de ces expériences (méthodologie, modifications du protocole, contraintes diverses, etc.).

This conference is taking place on the centenary of the initiation in 1875 of DEHERAIN'S experiments and its object is to analyse the recorded results of fertiliser trials of more than 50 years' duration and to extract information on :

— interest and scientific reasons ;
— the effects on soil and vegetation ;
— the conduct of the experiments and their interpretation (methodology, changes in design, various limitations, etc).

PRÉSIDENT DU COLLOQUE

Monsieur DELAGE, directeur de l'Institut national agronomique, Paris-Grignon.

COMITÉS SCIENTIFIQUE ET D'ORGANISATION

Président : Monsieur DROUINEAU, inspecteur général, Institut national de la Recherche agronomique, Paris.

Vice-Présidents : Messieurs BOYELDIEU et MOREL, professeurs à l'Institut national agronomique, Paris-Grignon, Grignon.

Secrétaire : Monsieur GERVY, Fédération nationale de l'Industrie des Engrais, Paris.

Trésorier : Monsieur BUSCH, Fédération nationale de l'Industrie des Engrais, Paris.

Membres : Mesdames BONIFACE et PÉLÉKHINE, Messieurs BLANCHET, BOURHIS, CHAUSSIDON, d'ESTAIS, GACHON, HÉBERT, HÉNIN, MARÉCHAL, REBISCHUNG, RÉCAMIER, TROCMÉ.

Colloque international
sur

« Les essais de fertilisation de très longue durée et leurs enseignements »
(Centenaire du champ d'expérience DEHÉRAIN

6-7-8 juillet 1976
INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE, PARIS-GRIGNON
GRIGNON (France)

International Conference
on

« Very long-term fertilizer experiments and their results »
(Centenary of the DEHÉRAIN field experiments)

6-7-8th July 1976
NATIONAL AGRONOMIC INSTITUT, PARIS-GRIGNON
GRIGNON (France)

оборота в котором все 4 культуры реализовывались каждый год доставляют данные интересующие современные хозяйства, при условии применения соответствующих доз удобрений. Опыты с одной только культурой в год — менее полезны, и они в конце концов подверглись изменениям, или были упразднены.

Старые опыты на пастбищах не дали требовавшегося типа сведений и были поэтому остановлены. Опыты на укосных лугах продолжают доставлять нужные сведения, даже после срока 120-ти летней длительности.

Данная работа заключает также описание более недавних опытов, продолжающихся до сих пор, и позволивших собрать сведения о следующих важных вопросах :

1. Сравнении действия органических и минеральных удобрений в долгосрочных опытах;
2. Изменениях запасов органического вещества, азота, фосфора и калия в почвах, в зависимости от системы культуры и удобрения;
3. Балансах питательных веществ;
4. Освобождении питательных элементов из запасов почв;
5. Ценности остатков удобрений и навоза в почвах;
6. Балансах остальных питательных веществ и микроэлементов;
7. Разработке и калибровке методов анализа почв;
8. Действия данной культуры на культуры следующие за ней;

Опыты продолжающиеся еще в настоящее время были применены к современным условиям культуры, удобрения и животноводства. Они представляют исключительные условия стандардизации, позволяющие лучшее изучение действия климатических условий на культуры, почвы и факторы управляющие плодородием почв. Среди всех опытов начатых в 19-м веке, опыты длящиеся до сих пор могут с успехом продолжаться еще, по крайней мере, до 2 000-го года.

REFERENCES

Avery B. W., Bullock P., 1969. The soils of Broadbalk. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1968, Part. 2, 63-93.

Bedford (Duke of), Pickering S. U., 1914. The effect of one crop upon another. *J. agric. Sci., Camb.*, **6**, 136-151.

Bolton J., 1972. Changes in magnesium and calcium in soils of the Broadbalk wheat experiment at Rothamsted from 1865 to 1966. *J. agric. Sci., Camb.*, **97**, 217-223.

Boyd D. A., Trist P. J. O., 1966. The Saxmundham Rotation Experiments. Rotation II, 1899-1952. *J. agric. Sci., Camb.*, **66**, 337-339.

Catt J. A., King D. W., Weir A. H., 1975. The soils of Woburn Experimental Farm. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1974, Part, **2**, 5-28.

Chambers W. E., 1953. Nutrient composition of the Broadbalk Continuous Wheat Experiment. I. Changes over 70 years. *J. agric. Sci., Camb.*, **43**, 473-478.

Cooke G. W., Williams R. J. B., 1972. Problems with cultivations and soil structure at Saxmundham. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1971, Part, **2**, 122-142.

Crowther E. M., 1949. Soil fertility problems in tropical agriculture. *Tech. Commun. Commonw. Bur. Soil Sci.*, No. 46, 134-142.

Dyer B., 1894. On the analytical determination of probably available 'mineral' plant food in soil. *J. chem. Soc.*, **65**, 115-167.

FISHER R. A., 1924. The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted. *Philos. Trans. B.*, **213**, 89-142.

GARNER H. V., 1965. Broadbalk Wilderness. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1964, 218-223.

HALL A. D., 1917. The book of the Rothamsted Experiments. 2nd Edn. London : John Murray, 332 p.

HODGE C. A. H., 1972. The soils at Saxmundham Experimental Station. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1971, Part, **2**, 143-148.

JENKINSON D. S., 1971. The accumulation of organic matter in soil left uncultivated. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1970, Part, 2, 113-137.

JOHNSTON A. E., CHATER M., MATTINGLY G. E. G., 1975. Experiments made on Stackyard Field, Woburn, 1876-1974. Parts I, II and III. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1974, Part, **2**, 29-77.

JOHNSTON A. E., WARREN R. G., PENNY A., 1970. The value of residues from long-period manuring at Rothamsted and Woburn. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1969, Part **2**, 5-90.

JOHNSTON A. E., PENNY A., 1972. The Agdell Experiment, 1848-1970. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1971, Part, **2**, 38-68.

LAWES J. B., 1847. On agricultural chemistry. *Jl R. agric. Soc.*, **8**, 226-259.

LAWES J. B., 1889. The history of a field newly laid down to permanent grass. *Jl R. agric. Soc.*, **25**, 1-24.

LAWES J. B., GILBERT J. H., 1895. The Rothamsted Experiments ; being an account of some of the results of the agricultural investigations conducted at Rothamsted, in the field, the feeding shed, and the laboratory, over a period of 50 years. *Trans. Highland and agric. Soc. Scotland*, **9**, 1-354.

MATTINGLY G. E. G., JOHNSTON A. E., CHATER M., 1970. The residual value of farmyard manure and superphosphate in the Saxmundham Rotation II Experiment, 1899-1968. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1969, Part, **2**, 91-112.

OLSEN S. R., COLE C. V., WATANABE F. S., DEAN L. A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *U. S. Dep. Agric. Circ.*, No. 939.

PAWSON H. C., 1960. Cockle Park Farm. An account of the work of the Cockle Park Experimental Station from 1896 to 1956. London : Oxford University Press.

RICHARDSON H. L., 1938. The nitrogen cycle in grassland soils : with especial reference to the Rothamsted Park Grass Experiment. *J. agric. Sci., Camb.*, **28**, 73-121.

RIPLEY P. O., 1941. The influence of crops upon those which follow. *Scientific Agriculture, 21 : 9*, 522-583.

ROTHAMSTED EXPERIMENTAL STATION, 1969. The Broadbalk Wheat Experiment. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1968, Part, **2**, 7-215.

ROTHAMSTED EXPERIMENTAL STATION, 1974. Guide, pp. 43-75. Harpenden : Lawes Agricultural Trust.

RUSSELL E. J., VOELCKER J. A., 1936. Fifty years of field experiments at the Woburn Experimental Station. London : Longmans Green and Co.

SCHOFIELD R. K., 1955. Can a precise meaning be given to 'available' soil phosphorus ? *Soils Fertil*, **18**, 373-375

THORNE C. E., 1926. The function of organic matter in the soil. *J. Am. Soc. Agron.*, **18**, 767-793.

TRIST P. J. O., BOYD D. A., 1966. The Saxmundham Rotation Experiments : Rotation I. *J. agric. Sci., Camb.*, **66**, 327-336.

WARREN R. G., 1956. NPK residues from fertilizers and farmyard manure in long-term experiments at Rothamsted. *Proc. Fertil. Soc.*, No. 37.

WARREN R. G., 1958. The residual effects of the manurial and cropping treatments in the Agdell Rotation Experiment. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1957, 252-260.

WARREN R. G., JOHNSTON A. E., 1960. The Exhaustion Land Site. *Rep. Rothamsted exp. Stn for 1959*, 230-239.

WARREN R. G., JOHNSTON A. E., 1962. Barnfield. *Rep. Rothamsted exp. Stn for 1961*, 227-247.

WARREN R. G., JOHNSTON A. E., 1964. The Park Grass Experiment. *Rep. Rothamsted exp. Stn for 1963*, 240-262.

WARREN R. G., JOHNSTON A. E., 1967. Hoosfield Continuous Barley. *Rep. Rothamsted exp. Stn for 1966*, 320-338.

WILLIAMS R. J. B., COOKE G. W., 1971. Results of the Rotation I Experiment at Saxmundham, 1964-69. *Rep. Rothamsted exp. Stn for 1970*, Part, **2**, 68-97.

DISCUSSION

L. C. N. De La Lande Cremer.

Question : Est-ce que les traitements au fumier et au fumier + N apportèrent plus de P ou K que les autres traitements et les différences de rendements peuvent-elles être expliquées de ce fait ?

G. W. Cooke.

Answer : The F.Y.M. supplies as much P and more K than fertilizers *but* the soils are already so rich in P and K that we do not believe that this difference is responsible for better yields from F.Y.M.

L. Gachon.

Question : Quelles hypothèses formulez-vous pour expliquer les différentes courbes de réponse aux engrais P ou K observés sur les sols anciennement enrichis par opposition aux sols ne bénéficiant que de fumures récentes ?

G. W. Cooke.

Answer : The differences are due to the « availability » of immobile nutrients (P, K) to root systems. Enriched soil supplies P and K to all parts of the root systems ; « fresh » phosphate often lies in soil in positions where it is not reached by the roots of an annual crop.

P. Ott.

Question :

— Résultats intéressants quant à l'évaluation des rotations (Broadbalk field on wheat).

Suite à ces résultats, une augmentation du nombre des cultures et une diversification plus poussée est-elle envisagée ?

— Quels sont les protocoles d'analyses mis en place pour essayer de répondre aux questions posées par les résultats ?

— Existe-t-il une publication relative à ces résultats ?

G. W. Cooke.

Answer :

— No further changes in the rotation are planned but changes in crops in the rotation may become essential (for example the beans are now damaged by nematodes and may have to be replaced by another crop).

— Standard analytical methods are used.

— Publication each year in « Results of the yield Experiments » published by Rothamsted Experimental Station.

M. Loué.

Question : Le Dr Cooke a projeté un graphique de bilan K_2O sur un essai de longue durée. Le bilan était représenté par une droite. La question est la suivante : s'agissait-il de K_2O échangeable à l'acétate d'ammonium ou d'une autre méthode. L'expérience que nous avons est qu'un réactif associant tétraphénylborate de sodium et chlorure de sodium rend mieux compte des bilans que K échangeable.

G. W. Cooke.

Answer :

All measurements of exchangeable K are made by exchange with N ammonium-acétate solution.

1re SÉANCE — 1st SESSION

INTERVENTIONS DES PAYS NORDIQUES
CONTRIBUTIONS FROM NORTHERN COUNTRIES

Président de séance : M. G. Drouineau

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 539-545.

LONG TERM FERTILIZATION WITH PHOSPHORUS AND POTASSIUM ON A CAREX-PEAT SOIL IN SOUTHERN FINLAND

J. KORKMAN,

Kemira Oy, Box 330,
00101 Helsinki 10

ABSTRACT

On a Carex-peat soil in Southern Finland an experiment was carried out from 1905 to 1967, where phosphorus and potassium fertilizers separately and together were used annually. The main test plants were hay ley, cereals and root crops. The effect of phosphorus alone was reasonable and the effect of phosphorus and potassium together was good and unchanged throughout the experimental period. Potassium alone did not give sufficient growth. It is assumed that the peat has mineralized about 6 000 kg nitrogen per hectare on the PK-dressed plots during the test period. Nitrogen is not supposed to have restricted yields though no nitrogen fertilizers were used in the experiment.

INTRODUCTION

On a Carex-peat soil cleared for cultivation in 1904 at Leteensuo experimental station in Southern Finland a field trial on phosphorus and potassium fertilization was carried out between 1905 and 1967. The station belonged to the Society of Peat Cultivation which concentrated the experimental work to another experimental station when this long term trial was finished. The results have been published until 1958 by PESSI (1960). Reports on various details from earlier periods were published by RINDELL (1913, 1914), VESIKIVI (1924) and HIRVENSALO (1947).

EXPERIMENTAL DETAILS

The experiment was established in 1905 with 10 testplots of 10 × 10 m each.

The treatments were as follows (2 replicates) :

1. O
2. P
3. K
4. PK
5. PK + lime

The yearly used dressings were with a few exceptions:

P : 40 kg/ha P_2O_5
K : 100 kg/ha K_2O

Liming on the limed plots was given in five doses :

1905	2 000	kg/ha	$Ca(OH)_2$
1923	1 000	—	—
1927	1 000	—	—
1933	1 000	—	—
1941	1 000	—	$CaCO_3$

Moreover the complete test field was given 400 m^3/ha clay in 1905 and 200 m^3/ha in 1941.

Until 1917 phosphorus was given as Thomas phosphate and potassium as kainite. The 1918 fertilizers were bone meal and low percentage potassium chloride. Since 1923 the phosphorus was given as various types of superphosphate and potassium as potassium chloride of various richness. During the 63 years of the trial situated on the experimental station there was a four year period 1919-22 when the whole area was fertilized with phosphorus and potassium. The total amount given during this period was approximately 176 kg/ha P_2O_5 and 384 kg/ha K_2O. Smaller deviations from the experimental plan occurred in 1924 (35 kg/ha P_2O_5) and in 1931 when the fertilizer quantities were doubled on the turnip crop (80 kg/ha P_2O_5, 200 kg/ha K_2O). No fertilizers were given in 1906.

RESULTS

The results until 1958 were published by PESSI (1960). During the period 1959-67 the crop was hay for all nine years.

TABLE I

Annual yields during the last nine test years

Hay yield kg/ha

	Fertilizer treatment				
	O	P	K	PK	PK + lime
1959	1 020	6 690	810	7 990	8 550
1960	2 670	5 750	2 450	7 170	7 230
1961	1 580	3 630	1 830	4 860	5 030
1962	1 240	4 920	1 710	6 330	6 320
1963	1 150	5 320	1 080	6 820	6 590
1964	190	4 040	150	5 980	6 360
1965	130	3 000	60	5 550	5 500
1966	300	2 910	310	5 550	5 570
1967	610	5 000	430	5 750	4 890

Hay crops :

The yield development during the last grassland period (table 1) is significant for the whole period. In figure 1 the mean results from all ley years are shown. The absolute effect of fertilizers, averaging at + 3 160 kg/ha for P and + 5 100 kg/ha for PK, was by far independent on the age of the ley. Within about six years the grass yields on unfertilized plots had dropped to practically nil.

Cereal crops :

The results for oats and barley are given in table 2 as published by PESSI (1960).

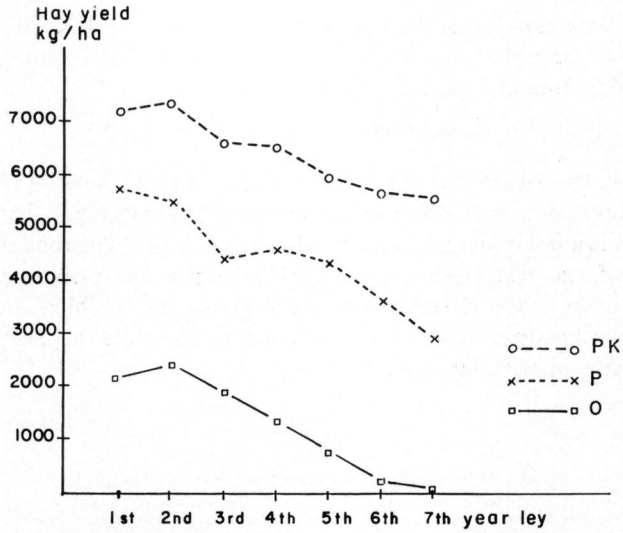


FIG. 1. — *Grassland yields. Means of the results from 1923-29, 1933-36, 1942-47 and 1959-65*

TABLE 2

Average annual grain yields of oats (12 years), *barley* (7 years) *and spring wheat* (2 years)
Grain yields kg/ha

Treatment	Oats	Barley	Spring wheat
O	1 230	560	560
P	2 630	1 320	1 420
K	1 490	820	610
PK	3 000	1 740	2 090
PK + lime	2 880	1 940	2 090
Significant yield increase	* = 285	* = 506	
	** = 381	** = 685	
	*** = 501	*** = 918	

TABLE 3

Oats yields 1905 and 1958
Grain yields kg/ha

Treatment	First year with oats (1905)	Last year with oats (1958)
O	890	1 330
P	+ 1 510	+ 1 630
K	+ 120	— 80
PK	+ 1 860	+ 2 100
PK + lime	+ 1 330	+ 2 120

There has been no change in the effectiveness of P and K on cereals during the period. As an example the oats yields are shown at the beginning and towards the end of the experimental period (table 3).

Other crops :

Especially in the earlier part of the test period root crops, such as turnips, swedes, potatoes and sugar beet, were often grown in the field experiment. In 1908 and 1915 the test plant was a pea crop and in 1913 oats with vetches. The root crops have from the beginning of the test been very sensitive to the phosphorus and potassium fertilizing. The O-and sole K-treatments have given yields which are close to nil. Phosphorus alone has not either given sufficient yield, while the PK-treatment has been effective with or without lime.

TABLE 4

Root crop yields. Average of all root yields (8)

Treatment	Roots (kg/ha)
O	4 420
P	15 850
K	5 730
PK	26 600
PK + lime	28 120

DISCUSSION

No definite changes in the soil productivity can be extracted from this long term fertilizer trial. It is obvious that the Carex-peat has not changed very much during the period. pH values are available from 1926 and 1962 and no significant changes can be seen (table 5) :

TABLE 5

pH in surface soil

Treatment	pH_{H_2O}	
	TUORILA (1926)	PESSI (1962)
O	4.3	4.6
P	4.6	4.8
K	4.4	4.6
PK	4.8	5.0
PK + lime	5.4	5.2

The pH-effect of phosphorus is obviously due to the Thomas phosphate used 1905-1917. The diminished lime effect in 1962 is understandable as the last liming was done in 1941.

No soil analysis results have been available. When the experimental station at Leteensuo was closed, soil samples were taken by the Department of Soil Chemistry at Helsinki University, where the samples are stored and available for research workers.

An interesting fact is that the yields from the cereals of the unfertilized plots have relatively been far better than from the other crops. Even in definitely phosphorus and potassium deficient conditions the yield has been 2-5 times the seed amount. The nutrient reserves in seeds seem to enable such a production, though a small amount of nutrients can be mineralized from the peat.

The mineralization of the Carex-peat nitrogen has supplied nitrogen to the crops during the total experimental period. No fertilizer nitrogen was added during the period except in 1918 with the bone meal. The amount of taken up nitrogen from the PK fertilized plots is assumed to be approximately 50 kg/ha/a for the cereals and 140 kg/ha/a for the hay crops, totalling at about 6 000 kg N/ha for the total test period. The approximative amounts of P_2O_5 and K_2O given during the same period were 2 600 kg/ha and 6 100 kg/ha respectively.

TABLE 6

Residual effects of the treatment during 1919-22 when all plots were fertilized uniformly

Year	Plant	Actual treatment		original treatment			
				O		PK	
				Yield		Yield	
		P_2O_5 kg/ha	K_2O kg/ha	kg/ha	rel.	kg/ha	rel.
1919	barley	56	84	470	100	1 380	294
1920	oats	40	100	no results			
1921	ley	40	100	4 490	100	6 180	138
1922	ley	40	100	6 470	100	7 050	109

An interesting test at the closing of the experimental station would have been the following of the yields with an uniform fertilization. When the area was uniformly fertilized in 1919-22, a 3-4 year residual effect could be noticed (Table 6).

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

ESSAI DE FERTILISATION PHOSPHATÉE ET POTASSIQUE DE LONGUE DURÉE EN SOL DE TOURBE A CAREX DU SUD DE LA FINLANDE

Dans l'expérience de longue durée effectuée en sol de tourbe à carex du sud de la Finlande, de 1905 à 1967, un engrais phosphaté et un engrais potassique ont été utilisés chaque année, ensemble et séparément.

Les principales cultures présentes dans l'essai ont été : foin, céréales (blé de printemps, orge, avoine) et des plantes racines.

L'effet de l'engrais phosphaté utilisé seul a été nettement plus marqué que celui de l'engrais potassique. L'emploi des deux éléments a donné un bon résultat pendant toute la durée de l'expérience.

On peut estimer qu'au cours de cette expérience la tourbe a minéralisé environ 6 000 kg d'azote par hectare dans les parcelles PK. On peut supposer que le non emploi d'engrais azoté n'a pas eu de conséquence sur les rendements.

ZUSAMMENFASSUNG

DAUERDÜNGUNGSVERSUCH MIT PHOSPHAT UND KALI AUF EINEM SÜDFINNISCHEN WIESENEGGENTORFBODEN

In einem Dauerversuch, der in Südfinnland in 1905-1967 auf einem Wieseneggentorfboden durchgeführt wurde, wurden ein Phosphatdünger und ein Kalidünger jedes Jahr zusammen und vereinzelt angewendet.

Die im Versuch vorhandenen Hauptkulturen waren die folgenden : Heu, Getreide (Sommerweizen, Gerste, Hafer) und Wurzelpflanzen.

Der allein angewendete Phosphatdünger übte eine wesentlich deutlichere Wirkung aus, als der Kalidünger. Bei der Anwendung der beiden Produkte konnte ein gutes Ergebnis in der ganzen Versuchsperiode erhalten werden.

Während dieses Versuchs dürfte der Torf circa 6 000 kg Stickstoff/ha in den PK Parzellen mineralisiert haben. Es kann angenommen werden, dass die fehlende Anwendung der Stickstoffdünger keine Nachwirkung aud die Erträge hatte.

РЕЗЮМЕ

Опыт длительного применения фосфорного удобрения в торфяно-осочной почве юга Финляндии.

Ж. КОРКМАН.

В долгосрочном опыте, проводившимся на торфяно-осоковой почве юга Финляндии и длившимся с 1905 до 1967-го года почва получала каждый год совместно или по отдельности фосфорное и калийное удобрения.

Главными культурами опыта были : сено, злаки (яровая пшеница, ячмень и овес) и корнеплоды.

При отдельном применении действие фосфорного удобрения было более сильным чем действие удобрения калийного. Совместное-же внесение этих двух удобрений давало хорошие результаты в течении всего опыта.

Можно считать что в течении опыта торф минерализировал приблизительно 6 000 кг азота/га в делянках удобренных РК. Отсутствие азотного удобрения как будто не отразилось на урожайности.

REFERENCES

HIRVENSALO U. E., 1947. Suoviljelysyhdistyksen koeasemien v:n 1946 koetuloksia. I. Leteensuon koeasema. *Yearbook of the Society of Peat Cultivation*, 1947, 51-52.

PESSI Y., 1960. Fen fertilization with potash in the light of tests at Leteensuo experimental station *J. Scient. Agric. Soc. Finland*, **32**, 229-238.

PESSI Y., 1962. The pH-reaction of the peat in long-term soil improvement and fertilizing trials at the Leteensuo experimental station. *J. Scient. Agric. Soc. Finland*, **34**, 44-54.

RINDELL A., 1913. Katsaus kalkitsemiskokeiden tuloksiin. *Yearbook of the Society of Peat Cultivation* 1913, **2**, 177-178.

RINDELL A., 1914. Kokeet mutasuolla ilman maanparannusaineita. *Yearbook of the Society of Peat Cultivation* 1914, 182.

TUORILA P., 1926. Maanparannuksen ja lannoituksen vaikutuksesta viljeltyjen soittemme happamuuteen ja tämän sekä maan kasvukunnon välisestä suhteesta. *Yearbook of the Society of Peat Cultivation* 1926, 97-145.

VESIKIVI A., 1924. Erään Leteensuon koeasemalla suoritetun kali- ja fosforihappolannoituskokeen tuloksista. *Yearbook of the Society of Peat Cultivation* 1924, 116-122.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 547-564.

EFFECT OF NITROGEN, PHOSPHORUS AND POTASSIUM FERTILIZERS AND FARM MANURE IN LONG-TERM EXPERIMENTS WITH ROTATION CROPS IN NORWAY

G. UHLEN

Agricultural University of Norway,
1432 Ås NLH

SUMMARY

Some results from long-term fertilizer experiments at Møystad, Voll and Ås (Norway) are presented. A 6 to 7 course rotation with 3-4 years arable crops and 3 years clover-timothy ley has been carried through.

The yield on the non-treatment plots at Voll and Ås went down to 50 p. 100 or less of that of the comparison NPK-treated plots in about 25 years. Correspondent figures for the unmanured Møystad plots, however, were 70-80 p. 100. The most limiting nutrient element in unmanured soils has been phosphorus at Møystad and Voll, whereas potassium defiency caused the greatest yield losses in the last rotational period at Ås. The somewhat higher yielding capacity of the untreated soil at Møystad compared to Voll and Ås, was not explained by chemical analytical figures of the top soil layers.

Compared to the non-treatment, farm manure gave higher nitrogen and carbon percentages of the soil. Roughly calculated, about 25-30 p. 100 of the nitrogen and 17 p. 100 of the carbon in the added manure could be left in the soil after 30-50 years. A small increase in soil nitrogen and carbon resulted from moderate fertilizer applications, whereas a fifty years application of heavy NPK-doses at Møystad gave as high C and N percentages of the soil as did farm manure. Farm manure increased C/N ratios of the Møystad soil.

Leaving out the NPK-fertilizer resulted for many of the rotation crop members in a high nitrogen percentage of the dry matter yield, and did not lead to a nitrogen poor type of organic matter in spite of large net removals of nitrogen.

INTRODUCTION

In this paper some results from three long term field experiments will be dealt with. At the State Experimental Station Møystad near Hamar, experiments have been run since 1922. The results up to 1963 were presented by Rønsen (1965),

VIGERUST and RØNSEN (1965) and those for the period 1964-70 by JETNE (1974). At the State experimental Station Voll (Trondheim), one experiment was started in 1917 and another one in 1924. The results for the first 3-4 periods are published by LØVØ (1950). The long term experiments at the Department of Soil Fertility, Agricultural University of Norway, Ås, were started in 1938. Results for the period 1938-50 have been published (UHLEN, 1956).

The author wishes to thank Director J. FURUNES at Voll, Director M. JETNE and Research Officer E. EKEBERG at Møystad for the providing of additional results and soil samples from the experimental plots.

SOILS AND CLIMATE

The soil at the experimental site at Møystad is a moranic sand. Cambro-silurian rocks are forming the dominant parent material of the fine-textured part of the soil (VIGERUST and RØNSEN, 1965). The clay and humus content varies a great deal within the plots. The texture figures given in Table 1 denote percentages of texture classes less than 2 mm. In addition, the gravel content of the Møystad soil amounts to 20 p. 100 in the top soil and occasionally even 30-40 p. 100 of the soil body in subsoil layers. In this moranic type of soil the roots may be well developed in the subsoil as well as in the plow layer. Organic matter according to a dichromate oxidation method gave figures for the below plow layer samples of 55-70 p. 100 of those of top soil (HOVDEN, 1937).

TABLE 1

Soil analysis data.
Mean figures for NPK *treated plots*

		Percentages of dry soil					mg/100 g dry soil (1)			pH, H_2O
		C	N	Clay	Silt	Sand	P-AL	K-AL	K-HNO_3	
Møystad (1963-75)	0-20 cm	2.9	0.31	15	35	50	3	5	35	6.3
	20-40 cm			7	37	56	2	3	30	6.5
Voll (2) (1969)	0-20 cm	4.3	0.34	25	60	15	6	7	168	5.9
Ås (1968)	0-25 cm	3.2	0.29	25	52	23	5	8	50	5.8
	25-40 cm	1.3	0.1	25	50	25	2	4	60	5.8

(1) P-AL and K-AL = Easily soluble P and K according to Egners am. lact. acet. method K-HNO_3 = K soluble in boiling 1 N HNO_3.

(2) Analysis in 1925 indicate large quantities of HCl-soluble K in samples from 20-60 cm, whereas tot.-N seemed to be 0.05 p. 100 or less.

The soil of the Voll and Ås experimental plots are dominated by silt and clay of glacial marin deposits. Outwash from moranic deposits has resulted in varying amounts of coarse sand and gravel in the Ås topsoil. The amount of organic matter build up in the sub plow layers is less at Ås and Voll than at Møystad.

The climatic condition at the three places may be roughly characterized by the temperature and rainfall mean in the growing season and mean annual rainfall as it follows :

	Latitude	Altitude (m)	Temp. mean May-Sept.	Rainfall, millimetres	
				May-Sept.	Annual
Møystad	60° 48	165	12.6°C	300	530
Voll	63° 25	127	11.3°C	350	850
Ås	59° 40	95	13.6°C	380	785

EXPERIMENTS, CROPS AND TREATMENTS

The Møystad experiment E is composed of 8 treatments and experiment F of 10 treatments, in both cases arranged in block designs with 4 replicates.

At Voll the experiment H, run from 1917 and up to 1969 consisted of 6 treatments replicateds 3 times, and the experiment K (1924-75) likewise of 6 treatments, however with 4 replicates.

The Ås experiments consist of four 6 × 6 latin square plots giving all together 15-20 different treatments combinations.

The crop sequences have been rather similar at the three places. A 7 course rotation composed of potatoes, spring wheat, barley and 3 year clover-timothy ley, followed by oats, has been carried through at Møystad. The rotation periods at Voll have been varied between 6 and 7 years and the ley period from 3 to 4 years. The arable crop sequence has been spring cereal, potatoes or root crops, followed by spring barley. At Ås a 6 course rotation of oats, potatoes, spring wheat or barley and 3 year ley has been used. For all three sites clover-timothy mixture was seeded in with spring grain, principally barley.

Farm manure will normally be applied only once in a rotational period, however, fifty years ago it was good reason to apply the manure to several of crop members of the rotation. The Møystad experiment includes treatments in which farm manure is spread over 2 or 4 years of the 7 course rotation. The potato crops, however, received the largest dose, 70 tons per hectare in experiment E and 42 and 87.5 tons in the F-experiment. The FYM-plots have got, in total for the 49 years, 735 tons (E) and 858 tons (F) of manure per hectare.

In the Voll experiments farm manure applications have been varied somewhat, as well within treatments, as from one period to another. In the first rotation period, farm manure was given to most of the arable crop species as well as to the 2nd year old ley. In the later period, however, the row crop received the main part of the farm manure. In total for 47 years the full rate FYM plots in the H-experiment received 812 tons manure per hectare. The amounts of farm manure used in combination with fertilizers in the K-experiment has been 60 or 50 tons for the row crops, totalling 390 tons per hectare in the period 1924-70.

In the Ås experiment all N, P and K treatments combinations got 60 tons manure as a basal dressing in the potato year. The experiment includes in addition, plots without manure or fertilizers. After five rotational periods, the residual effects of manure as well as of fertilizers have been measured for an additional 6 years period.

The fertilizer treatments are shown in the yield tables (2-5). Nitrogen has been applied as calcium nitrate (15.5 p. 100 N), phosphorus as superphosphate (8. p 100 P) and potassium as potassium chloride (33-49 p. 100 K). For potatoes potassium sulphate replaced the potassium chloride. In general, it can be said that the fertilizer rates in these long term experiments are rather small, with the exception of the so-called fertilizer compensation treatment used in one

of the Møystad trials. To the four subplots of this treatment have been added each year amounts of N, P and K as fertilizers, equivalent to what a good crop yield is expected to remove from the soil. About 5 times more N is added in this treatment than was the case in the ordinary NPK-treatment. The distribution of the nitrogen upon the different crops in the rotation, however, has not been the best one. A rather high application of nitrogen to the spring cereal has caused lodging and damage to the establishment of the ley herbage, whereas on the other hand, the yield of grasses in the 2nd and 3rd ley year no doubt could have been increased by heavier applications than the doses used.

YIELD RESULTS

In this paper only the average yield figures for whole rotational periods will be presented. The yield of potatoes, cereals and hay are transformed to fodder units. In this calculation 1 fodder unit is set equivalent to : 1 kg of barley or wheat

TABLE 2

Summarized yield data

Møystad (1922-1970)

Treatments in E-experiments	NPK in kg/ha/7 years			Rotational periods						
				1	2	3	4	5	6	7
				Fodder units/ha/year						
NPK	151	104	216	3 370	3 050	3 380	3 260	3 460	3 730	2 950
				Percentages of the NPK treatment :						
None	0	0	0	79	76	78	73	81	75	80
PK	0	104	216	89	85	96	89	97	94	87
NK	151	0	216	99	92	91	84	87	82	90
NP	151	104	0	103	93	100	92	98	97	98
NPK (compensation)	795	154	759	102	117	103	108	113	117	131
FYM	105 tons			94	97	104	100	104	102	103

LSD percentages : 5.3-8.3 in the periods.

				Fodder units/ha/year						
NPK	151	104	216	3 340	2 860	3 400	3 040	3 330	3 550	2 770
				Percentages of the NPK treatment						
None	0	0	0	87	77	77	71	71	72	74
N	151	0	0	90	82	75	71	71	72	78
P	0	104	0	89	85	89	83	83	85	83
K	0	0	216	85	77	78	74	77	80	79
NPK (doubled)	302	208	428					111	110	111
FYM	123 tons			94	99	105	108	104	107	108

LSD percentages : 8.1-11.7 in the periods.

grain, 1.2 kg of oats, 0.95-1.1 kg of potato dry matter, 3.7-4.7 kg of cereal straw and 2.3-2.5 kg of hay (85 p. 100 dry matter). The factors used have differed somewhat between the 3 places, however, without influencing the main yield picture very much.

Mean yield figures for each rotational period are given in Tables 2-5 for the three experimental sites. The yields for a so-called ordinary NPK-treatment are given in fodder units, and the other treatments are calculated as percentages of this standard. Somewhat more of the N, P and K fertilizers was given to potatoes than has been the case for the other crops in the rotation. The ordinary NPK treatment at Voll represents somewhat larger applications than for the Møystad plots. Furthermore, the fertilizer rates have not been kept constant during the 50 years period at Voll. In the three later periods, more N was applied to ley, when appli-

TABLE 3

Summarized yield data

Voll (1917-1969)

Treatments in H-experiment 1917-63	Rotational periods						
	1	2	3	4	5	6	7
	Fodder units/ha/year						
$N_2P_2K_2$ (1)	4 360	4 130	3 390	4 390	4 590	4 810	4 940
	Percentages of $N_2P_2K_2$						
None	68	59	53	53	49	42	45
$N_1P_1K_1$ + 1/2 FYM	97	102	112	102	102	99	99
FYM 1/1	89	94	107	98	99	91	94
LSD percentages	9	9	19	13			
K-experiment 1924-69	1	2	3	4	5	6	7
	Fodder units/ha/year						
$N_2P_2K_2$ (2)	4 470	3 860	3 700	4 760	4 800	5 220	4 330
	In percentages of $N_2P_2K_2$						
None	79	69	61	51	47	47	48
$N_2P_2K_0$	98	94	97	88	91	84	82
$N_2P_2K_1$	101	99	102	100	97	96	95
FYM + $N_{1-2}P_{1-2}$	99	105	108	104	111	104	116
FYM + $N_{1-2}P_{1-2}K_1$	95	102	106	100	108	101	117
LSD percentages	8	14	12				

(1) Mean annual rates : 32 kg N, 20 kg P, 43 kg K/ha.
(2) — — — : 35 kg N, 19 kg P, 54 kg K/ha.

TABLE 4

Summarized yield data

Ås experiment

Main experimental periods (1939-1968)

Treatments	Rotational periods				
	1	2	3	4	5
	Fodder units/ha/year				
FYM + $N_1P_1K_1$ (1)	4 280	4 100	4 550	4 010	4 410
	Percentages of FYM + $N_1P_1K_1$				
None	83	69	64	56	52
FYM (every 6th year)	93	85	83	83	81
+ $N_0P_1K_1$	93	88	88	88	88
+ $N_1P_0K_1$	99	99	94	95	96
+ $N_1P_1K_0$	100	97	92	94	93
+ $N_2P_2K_2$	103	107	110	114	112

LSD percentages = 5.

(1) Mean annual rate : 25 kg N, 13 kg P and 33 kg K/ha/year.

TABLE 5

Residual experimental period. Ås (1969-1974)

Treatments in 1939-68	New treatments (1)								
	$N_0P_0K_0$	$N_1P_1K_1$	$N_2P_2K_2$	$N_0P_2K_2$	$N_1P_2K_2$	$N_2P_0K_2$	$N_2P_1K_2$	$N_2P_2K_0$	$N_2P_2K_1$
	Fodder units/ha/year								
FYM + $N_1P_1K_1$			5 185						
	In percentages of $N_2P_2K_2$ × FYM + $N_1P_1K_1$								
None	35	73	94	61	85	79	92	46	83
FYM	41	80	96	68	87	87	95	71	92
FYM + $N_0P_1K_1$			101	64	89				
FYM + $N_1P_0K_1$			97			85	95		
FYM + $N_1P_1K_0$			97					62	95
FYM + $N_1P_1K_1$	49	77	100	65	89	95	96	79	97
FYM + $N_2P_2K_2$	55	83	103						

(1) Mean annual rates per hectare for the new treatments : N_2 : 140 kg/N ; P_2 : 47 kg/P ; K_2 : 150 kg/K

cation after the 1. cut as well was introduced. This fact has to be considered when judging the relative yield figures in table 3.

The Ås experiment did not include treatments with only NPK in fertilizer. A treatment with FYM (60 t/hectare every sixth year) + yearly applications of NPK-fertilizer has been used for the comparisons made in Table 4. The last application of FYM took place in 1963, and the new treatments superimposed in the period 1968-1974 represent rather heavy rates of N, P and K in fertilizers.

Furthermore, it should be noticed that the clover content of the ley herbage has been rather high in the 1. and 2. year ley. The relative amounts of clover of the hay yield at Møystad have been for the non-treatment plots in the period 1926-1962, 70, 40 and 10-20 p. 100 respectively for the 1. 2. and 3. ley year, although the figures were somewhat less for the last rotational period (JETNE, 1974).

At Voll likewise high clover percentage figures were reported (LØVØ, 1950). The clover percentages were in most of the ley periods estimated to nearly 50 p. 100 of the herbage yield in the 2nd ley year, although being somewhat less in 1. year of the ley period. With the exception of the unfertilized control plots, practically no clover seemed to be left in the 3rd ley year. At Ås, the clover percentages of the hay yield averaged for all 1. and 2. year leys 25 p. 100, and again with very few clover plants surviving in the 3rd year of the ley period.

The yields without nutrient applications and the effect of farm manure

The relative yields of the unmanured plots may be taken as a measure of the soil fertility on the sites, although, as already said, the standards used for the comparisons here are not exactly the same for the three places.

From Table 2, we read that the non-treatment yields at Moystad has varied between 70 and 80 p. 100 of that of the ordinary NPK treatment. At Voll and Ås, the yields of the none treatment plots are decreasing to 50 p. 100 or less during a period of about 25 years. The average yields expressed in fodder units on the untreated soils, however, did not differ very much between the three sites, being roughly 2 500 at Møystad and Ås and slightly less at Voll.

Farm manure alone has resulted in the Møystad experiment in somewhat higher yields than those obtained by the ordinary NPK treatment. The somewhat larger NPK fertilizer treatment in the Voll experiment, however, has been competing well with the FYM treatment used. According to chemical analysis, the quality as well as the quantity of FYM have been much the same for the two sites. The declining yield effect of FYM in comparison with NPK in later periods at the Voll H-experiment is most likely explained by an increased rate of nitrogen application in the comparison treatment in period 6 and 7. Likewise in experiment K, FYM + N_1P_1, was changed to FYM + N_2P_2 in period 5-7.

Yield effects of fertilizer

The yields on all three sites could no doubt have been raized by using more N, P and K in fertilizers. The Møystad compensation NPK treatment has resulted in a 10 p. 100 yield increase over the ordinary NPK-rates, averaging the first 6 rotational periods. In the very last period, however, a 30 p. 100 yield increase was obtai-

ned. An increase in application rate from $N_1P_1K_1$ to $N_2P_2K_2$ at Ås, likewise increased yield 10 p. 100 during a 30 years period.

The treatments applied in the E and F experiments at Møystad make up a complete factorial NPK design in which the 3rd order interaction is confounded with E and F. However, two treatments, untreated and ordinary NPK are represented on the E- as well as on the F-plots and can be used for elimination of the yield level difference between the plots.

Main effects for the ordinary amounts of N, P and K and the interactions in fodder units/ha/year in the period 1922-70 are given below :

Main effects :	Interactions :
N = + 255 f.u.	NP = + 88 f.u.
P = + 414 —	NK = + 54 —
	PK = — 45 —
K = + 174 —	NPK = — 88 —

The LSD value can be set to about 100 f.u., although not exactly calculated for the whole period.

The largest response was obtained for phosphorus, 28 fodder units for each kilogram of P, against 12 f. u. per kg N and 6 per kg K. However, some interaction gains especially for the nitrogen, can be counted upon. Nitrogen alone, increased the yield 26 f. u. only, whereas N in combination with P, K or PK produced a 334 f. u. yield increase, or 15 fodder units for each kilogram of nitrogen added.

In the Voll experiment only the potassium effect has been separately examined. The $K_0N_2P_2$ plots gave only slightly less yield than the plots with potassium treatments in the first 3 rotational periods. However, the yield depressions due to insufficient K-supply became more pronounced in later period. Averaging the whole experimental period, the $K_1N_2P_2$ treatment, equivalent to 24 kg K/ha/year, increased yields as much as 400 fodder units per hectare and year, whereas the $K_2N_2P_2$ gave an additional 70 f.u. yield increase. The total yield gains after $N_2P_2K_2$ application, relative to $N_0P_0K_0$, amounts to 2 000 fodder units per hectare and year. Although potassium has played an important role in keeping a high yield level, nitrogen and phosphorus seem to have been even more essential. In the period 1917-1930 application of a small rate of nitrogen without P and K on three subplots gave a rather small yield increase compared to the unfertilized plots. In writing up a paper for the first 3-4 periods, Løvø (1950) therefore, concluded that the most limiting factor on the untreated soil in this case was an insufficient phosphorus supply.

In the Ås experiment, the effects of N, P and K fertilizers can be evaluated only as additions to normal rates of farm manure applications in the first 5 periods. The mean yield increase, in this case for the N_{25} $P_{13}K_{33}$ treatment came to 600 fodder units and that for $N_{50}P_{26}K_{66}$ 1 000 f.u./ha/year. It should be mentioned here that with the farm manure applied in the 5 periods some additional 1 250 kg N, 370 kg P and 1 340 kg K per hectare have been provided for.

In table 4 it can be seen that nitrogen fertilizer contributed more to the yield increases than was the case for the phosphorus and potassium additions. Nevertheless, the effect of K has been increasing during the 5 periods, and in the residual period (table 5) where farm manure was left out, potassium has become the main limiting element. In the period 1969-1974, the $N_2P_2K_0$ treatment added on formerly

untreated plots gave only 46 p. 100 as high yields as was the case for the fully treated plots, whereas yields on correspondent plots without N and P in this period reached 61 and 79 p. 100 of the comparison treatment yield.

Figures showing the effects of N, P and K in addition to farm manure in the 30 years periods are given below in fodder units per hectare and year. The amounts of the nutrient added are indicated and it may be seen that the N levels do not correspond exactly with those referred to in table 4.

N_0	N_{17}	N_{29}	N_{41}	P_0	P_6	P_{13}	P_{19}	K_0	K_{17}	K_{23}	K_{50}
3 800	+ 300	+ 550	+ 720	4 190	+ 120	+ 190	+ 190	4 210	+ 120	+ 190	+ 190

The figures demonstrate that the yield may be raised even more by increasing the N-supply, whereas adding more P and K will not produce higher yields. From this it may be reasoned that the relative contribution of N, P and K to the yield increases depends upon the application rates as well as the nutrient status of the soil.

SOIL ANALYSIS

Some summary results of the analysis of soil samples — taken at the end of the experimental periods — are shown in table 6, 7 and 8. As expected, the amount of easily soluble phosphorus and potassium according to the Egner ammonium

TABLE 6

Soil analysis data

Møystad (1968-1975). Top soil (0-20 cm)

Treatments	In percentages				mg/100 g dry soil				pH
	N	C	C/N	Ignition loss	P-AL	K-AL	Mg-AL	K-HNO_3	
None	0.314	2.75	8.8	6.65	1.0	4.8	4.5	37	6.3
NPK, ordinary	0.315	2.83	9.0	7.00	2.8	5.0	3.4	36	6.3
N-effects	+ 0.006	+ 0.05		+ 0.2					+ 0.1
P-effects					+ 1.6				
K-effects						+ 0.7		+ 2	
NPK compensation treatment	0.355 (1)	3.14 (1)	8.8	7.59	4.1	8.3	3.4	49	6.7
FYM, E-plots	0.345	3.12	9.1	7.85	2.6	7.2	8.8	43	6.4
FYM, F-plots	0.354	3.38	9.6	8.0	3.0	7.2	9.3	43	6.3

(1) Uncorrected values were 0.343 p. 100 N and 3.00 p. 100 C.

TABLE 7

Soil analysis data
Voll, 1969

Treatments	N (%)	mg/100 g dry soil		pH
		P AL	K-AL	
None	0.32	2.8	8.3	5.8
$N_2P_2K_0$	0.34	5.4	6.6	5.9
$N_2P_2K_1$	0.33	5.8	7.0	6.0
$N_2P_2K_2$	0.35	6.1	7.2	5.9
FYM + NP	0.36	7.0	6.9	5.9
FYM + NPK	0.37	7.1	7.4	5.9

TABLE 8

Soil analysis data
Ås 1968. Top soil (0-25 cm)

Treatments	Percentages				mg/100 g dry soil				pH
	N	C	C/N	Ignition loss	P-AL	K-AL	K-HNO_3	Mg-AL	
None	0.272	3.01	11.1	7.8	1.6	4.7	45	6.7	5.65
FYM	0.285	3.16	11.1	8.0	2.3	5.3	47	8.3	5.70
FYM + NPK (1)	0.294	3.28	11.2	8.4	4.6	7.6	49	7.7	5.85

(1) Averaging all NPK levels. For the $N_2P_2K_2$ treatment some additional increases of total nitrogen and carbon were found, although not statistically proved.

lactate acetate extraction methods were markedly influenced by the long time application of manure and fertilizer. This acid extraction method, pH 3.75, has proved to be very suitable for evaluating the phosphorus status of norwegian soils (UHLEN and SEMB, 1962). The K-AL and Mg-AL-values can be taken as expressions of the amounts of exchangeable K and Mg.

The figures in the table represent the top soil layer. As shown by VIGERUST and RØNSEN (1965) and JETNE (1974), farm manure and large phosphorus fertilizer application at Møystad increased the P-AL values of the 20-60 cm layers as well, although the increases were much less than was the case for the top soil samples. As to potassium the increases with depth were less than that for phosphorus.

In samples from 25-40 cm depth of the Ås plots, no consistent increases in P-AL or K-AL after P and K application was found.

Furthermore, as expected, additions of N in calcium nitrate resulted in some pH increases both at Møystad and at Ås.

The organic matter content of the soil is evaluated by determination of total carbon and total nitrogen as well as loss on ignition percentages of the soil samples. Changes in organic matter content, although small, may in the long run influence the productivity of the soil.

At Møystad, analysis of samples taken from all subplots of the F-experiment revealed significant influences of farm manure treatment upon the content of C, N and loss on ignition percentage. Furthermore, the C/N ratios were significant higher on the FYM plots, indicating that the organic matter residues of the farm manure had not reached the same stage of equilibrium as the soil organic matter. Some figures from the long term experiment at Broadbalk, Rothamsted (WARREN, 1956) also display increased C/N ratios on FYM plots compared to other treatments. At Ås, where the C/N ratios of the soil organic matter are somewhat wider, no difference in C/N between treatments with and without farm manure could be seen.

The total amounts of carbon added in the farm manure were not determined. At Ås, the dry matter and total nitrogen were respectively 22.3 and 0.42 p. 100, averaging the 5 periods 1938-68. The average nitrogen content of the farm manure used in the Møystad experiments seems to be much the same (0.41 p. 100 N) and likewise for the farm manure used in the first 3-4 periods at Voll (0.44 p. 100 N). In an attempt to calculate the contribution to the soil organic matter from the farm manure applied, the amount of carbon was estimated to be about half the organic dry matter, or 9 p. 100 of the farm manure used. The percentage of this estimated amount of carbon left in the soil according to the soil analysis come to 17 p. 100 for the Ås and for the Møystad plots. Likewise calculation of the percentage of farm manure nitrogen left in the soil after 30-50 years resulted in 30, 27, 28 p. 100 for the Ås, Møystad and Voll sites respectively. The results when using the carbon figures are in accordance with the tabulated summaries made by PEREPELITZA (1974) concerning long term experiments in the Sovjet as well as in other countries.

Furthermore, also in accordance with the PEREPELITZA summary work, artificial fertilizers have resulted in a little higher content of soil organic matter compared to that of the completely unmanured plots. We do not know, however, whether the C and N content of the soils have been increasing or declining during the 50 years period. Such measurements are made difficult by unavoidable changes in plowing depths as well as by the weaknesses associated with organic matter determinations made some decades ago.

The addition of large quantities of N, P and K in the comparison treatment at Møystad, resulted in a rather high soil content of N and C at the end of the fifty years period. This treatment is represented only on 4 subplots and a correction factor was introduced to reduce the great variability within the site. Nevertheless, the gain in soil organic matter by heavy fertilizer application seems to be realistic. The round numbered difference in soil nitrogen between the heavy and moderate fertilizer applications is 0.03-0.04 p. 100, equivalent to 750-1 000 kg of nitrogen per hectare in the plow layer. Again, this come to 15-20 p. 100 of the extra nitrogen added. Correspondent figures for the N added in NPK fertilizer to the Ås plots are about 20-25 p. 100.

PLANT ANALYSIS

No comprehensive plant analytical programs were carried through for the Møystad and Voll experiments, whereas crop yield samples were analysed for main nutritional elements each year at Ås. Only a very few results will be presented in this paper.

The effect of varying additions of nutrients upon the relative amount of nitrogen in the crop yields at Ås for the 5th period is quoted in table 9. Limiting supply of NPK has resulted in a very high percentage of nitrogen of the cereal straw and potato haulm. Likewise for the Møystad plots, the calculated amounts of nutrient removed (JETNE, 1974) demonstrate that nitrogen percentages of yields in the 7 course rotation have been higher for the non-treatment than for the ordinary NPK treatments. The relative N-rich humus raw materials added to the unmanured soils may partly explain why a nitrogen poor type of humus did not appear in the non-treated soil, in spite of large nitrogen losses during the 50 years period.

TABLE 9

Nitrogen content of crops
(1963-1968)

	Non treatment	FYM alone	FYM + $N_1P_1K_1$	FYM + $N_2P_2K_2$
Potato tubers (1)	0.35	0.25	0.23	0.24
Potato haulm	3.46	2.40	2.19	2.23
Barley, grain	1.43	1.48	1.49	1.55
Barley, straw	0.57	0.40	0.38	0.34
Clover hay 1. year	2.74	2.55	2.30	2.14
1. cut Timothy hay 1. year	0.93	1.05	1.00	1.05
1. cut Timothy hay 2. year	1.22	1.31	1.46	1.59
1. cut Timothy hay 3. year	1.06	0.95	1.01	1.09
2. cut Timothy hay 2. year	1.73	1.62	1.61	1.46
Oats, grain	1.83	1.85	1.83	1.80
Oats, straw	0.66	0.62	0.45	0.41

(1) In percentage of fresh potato tubers. For all other crops, in percentage of dry matter.

DISCUSSION

Long term experiments are essential or almost indispensable in judging the lasting effects of fertilizers and manure application upon soil properties and productivity. However, the changes in technology, leading to much higher demand for

plant nutrients in to days agriculture, have no doubt outdated many earlier treatment combinations in such experiments.

For the presented experiments, phosphorus has been the most limiting element in unmanured soil at Møystad and Voll, whereas potassium deficiency became very severe in the unmanured plots at Ås. However, when applying higher rates, larger yield gains were obtained from the nitrogen than for additional phosphorus and potassium fertilizers.

The higher relative yield on the non-treatment plots at Møystad than at Voll and Ås, was not explained by chemical analysis of the top soil layer at the three places. It is to be expected that a more deep-rooted behavior of the plants in the moranic sandy soil at Moystad has played an important role in the plant nutrition. Furthermore, investigations of available potassium in a soil from the same area, exhibited large liberation of potassium in spite of the fact that acid soluble as well as exchangeable potassium were rather low (SEMB, SORTEBERG and ØIEN, 1959).

Calculations of nutrient balances for the without K treatment at Ås display a net removal of potassium in the order of 1.5 tons K/ha in 30 years. In later period the K output in yield exceeded the total inputs even for the FYM + $N_2P_2K_2$-treatment. The large differences in the K-balances between the above treatments did not affect the exchangeable or acid-soluble soil potassium very much (table 8). The Møystad and Voll soils as well seem to have a very high buffer capacity in keeping a rather constant level of exchangeable potassium (table 6) in spite of the large variations in the quantities removed during the 50 years.

The input of phosphorus in farm manure alone has balanced in the Ås experiment the output in yield. In spite of this, however, additional P in fertilizers increased yields, and the total input had to be twice the output in yield in order to maintain the phosphorus status and maximum yield for this soil.

An actual question to be put is how the artificial fertilizer compete in yields with farm manure treated soils. When considering differences in nutrient application rates including also some changes during the experimental periods at Voll, no trend in favor of FYM over artificial fertilizer is apparent. These results seem to support the results from the Askov experiments (IVERSEN and DORPH-PETERSEN, 1951).

Nitrogen input-output calculations for the Ås experiment showed a net removal of 1.5 tons of N in 30 years for the untreated plots, whereas the input of N in FYM + $N_2P_2K_2$ treatment equalled the output in yield (N in clovers not included).

According to calculations made by JETNE (1974) the net removal of N amounted to 390-460 kg/hectare in the last 7 years period for non-treated soils at Møystad and 260-310 kg for the ordinary NPK-treated plots, whereas the input balanced the output in yields for the compensation treatment. In earlier rotation periods less accurate calculations can be made, however we may estimate the total net removals of nitrogen in 50 years to respectively 3 and 2 tons per hectare for the two first mentioned treatments. Part of this may be provided for by the clovers in the 1st and 2nd year leys. However, the total amount of nitrogen in the harvested clover yields does not add up to more than one quarter of the above mentioned net removals, and the N left in soil from the clovers and clover residues, therefore, cannot have provided for more than a minor part of the nitrogen used by the other crop. Non-symbiotical N-fixations are not likely to contribute much nitrogen, and the nitrogen

added in the rainfall is found to be small. The main part of the nitrogen in the crop yields on the unmanured as well as on the ordinary NPK treated plots most likely originate from the soil. This implies that the soil at Møystad has been loosing nitrogen and organic matter during the fifty years even when a ordinary NPK fertilizing was introduced. The contribution from the subsoil in relation to topsoil cannot be judged.

The amounts left in the soil of the nitrogen added in farm manure were found to be 25-30 p. 100 for the three sites. Likewise, the roughly calculated percentage of carbon left in soil came to 17 p. 100 of FYM-added C for the Ås as well as for the Møystad experiments. When equilibrated with the soil organic matter, — equilibrium not fully obtained at Møystad — a farm manure of this relatively dry composted type (C/N = 20-25) will preserve a larger part of its nitrogen in soil than could be expected for to-days liquid type of manure.

Artificial fertilizers may contribute to the soil organic matter maintenance by leaving larger amounts of crop residues in the soil. The proportion of the fertilizer nitrogen left in the soil may be significant, although as expected, less than after applying farm manure with a wide C/N ratio.

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

EFFETS DES ENGRAIS AZOTÉS ET POTASSIQUES ET DU FUMIER DE FERME DANS DES ESSAIS DE LONGUE DURÉE AVEC SUCCESSION DE CULTURES EN NORVÈGE

Cet article présente quelques résultats obtenus sur des essais de fertilisation de longue durée à Møystad, Voll et Ås (Norvège). La rotation d'une durée de 6 à 7 ans consistait en 3-4 années de plantes de grande culture et 3 années de prairie temporaire (Trèfle-fléole).

— Le rendement des parcelles non fertilisées à Voll et à Ås a diminué de 50 p. 100 et même davantage par rapport aux parcelles fertilisées avec NPK. Cependant, les valeurs correspondantes observées à Møystad, indiquaient pour la même période une diminution de rendement de 70 à 80 p. 100 pour les parcelles non fertilisées.

— Le phosphore a été le facteur le plus limitant à Møystad et à Voll dans les parcelles non fertilisées, alors qu'à Ås, les plus grandes pertes de rendement durant la dernière rotation ont été dues à la déficience en potassium. La productivité légèrement plus élevées des parcelles non fertilisées à Møystad par rapport à celles de Voll et d'Ås n'a pas pu être expliquée par les résultats des analyses chimiques des couches superficielles du sol.

— Les teneurs en C et N des parcelles fumier étaient plus élevées que celles des parcelles non fertilisées. En gros, environ 25-30 p. 100 de l'N et 17 p. 100 du C du fumier apporté pouvaient être restés dans le sol après 30 à 50 ans. Des doses modérées d'engrais minéraux ont augmenté légèrement les teneurs en N et en C du sol ; par contre, des apports de doses importantes de NPK pendant 50 ans à Møystad ont amené le sol à des teneurs en N et en C aussi élevées que dans le cas de l'application du fumier de ferme. L'utilisation de fumier de ferme a augmenté le rapport C/N des sols à Møystad.

— Pour beaucoup de cultures de la rotation, la suppression de la fertilisation NPK a abouti à un pourcentage élevé d'N dans la matière sèche produite et n'a pas conduit à un type de matière organique pauvre en azote, malgré une exportation nette élevée d'azote par les récoltes.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG DER STICKSTOFF-, PHOSPHAT-, KALI- UND WIRTSCHAFTSDÜNGER IN DAUERVERSUCHEN MIT FRUCHTFOLGE IN NORWEGEN

In diesem Artikel werden einige Resultate dargestellt, die in Dauerdüngungsversuchen in Møystad, Vollund Ås (Norwegen) erhalten wurden. Die 6-7 jährige Fruchtfolge fasste 3-4 Jahre mit ackerfähigen Kulturen und 3 Jahre mit Wechselwiesen um (Klee, Wiesenlieschgras).

— Den mit NPK gedüngten Parzellen gegenüber nahm die Ertragsleistung der ungedüngten Parzellen in Vollund Ås um 50 p. 100 und sogar mehr ab. Die in Møystad beobachteten entsprechenden Werte wiesen jedoch für die gleiche Periode, einen Ertragsrückgang um 70-80 p. 100 für die ungedüngten Parzellen auf.

— Der Phosphor stellte den Hauptbegrenzungsfaktor in Møystad und Voll in den ungedüngten Parzellen dar, während in Ås, die grössten Ertragsabnahmen in der letzten Fruchtfolge auf den Kalimangel zurückzuführen waren. Die etwas höhere Ertrasgleistung der ungedüngten Parzellen in Møystad im Vergleich zu denjenigen in Voll und Ås konnte nicht durch die Ergebnisse der chemischen Analysen der obersten Bodenschichten erklärt werden.

— Die Kohlenstoff — und Stickstoffgehalte in den Parzellen mit Wirtschaftsdünger waren höher als diejenigen in den ungedüngten Parzellen — Etwa 25-30 p. 100 Stickstoff und 17 p. 100 Kohlenstoff des Wirtschaftsdüngers blieben in Boden nach 30-50 Jahren. Durch mässige Mineraldüngergaben konnten die N-und C-gehalte im Boden geringfügig erhöht werden ; beachtliche NPK zufuhr während 50 Jahre in Møystad brachte dagegen den Boden zu so hohen N-C-gehalten wie bei Wirtschaftsdüngerverteilung. Die Wirtschaftsdüngeranwendung liess das C/N-Verhältnis der Böden in Møystad steigern.

— Für viele Fruchtfolgekulturen, wurde durch Beseitigung der NPK düngung, ein hoher N-Anteil in der gebildeten Trockensubstanz und keinerlei N-arme organische Substanz trotz einer deutlichen, bedeutenden Stickstoffausnützung des Ernteguts erhalten.

РЕЗЮМЕ

Изучение действия навоза, азотного, фосфорного и калийного минеральных удобрений в долгосрочных опытах севооборотов в Норвегии.

Г. ЮЛЕН.

Автор представляет несколько результатов, полученных в долгосрочных опытах удобрения в Мойштадте, Фолле, и Аше (Норвегия). В севообороты входило 6-7 последовательных культур и 3-х летнее искуственное пастбище, состоявшее из клевера и тимофеевки.

В течении 25-ти лет опыта урожайность контрольных неудобренных делянок в Фолле и Аше понизилась на 50 % и больше, по сравнению с делянками удобренными NPK. Но на неудобренных делянках Мойштедта, отмеченное за то-же время падение урожайности, составляло 70-80 %. На делянках без навоза в Мойштадте и Фолле недостаток фосфора являлся главным ограничивающим фактором, в то время как в Аше наибольшее падение урожайности в последний период севооборота было вызвано калиевой недостаточностью. Немного лучшую продуктивность контрольных делянок в Мойштедте по сравнению с делянками в Фолле и Аше нельзя об' яснить только результами химических анализов поверхностных слоев почвы.

На делянках получавших навоз, содержание азота и углерода в почве было выше чем на делянках без удобрения. Вобщем, около 25-30 % принесенного удобрениями азота, и 17 % принесенного углерода, оставались в почве после 30-50 лет обработки. Умеренные дозы минерального удобрения позволили немного увеличить содержания азота и углерода в почве; и, напротив, внесение повышенных доз NPK в течении 50-ти лет в Мойштадте, позволило достичь таких-же высоких содержаний C и N в почве, как и в случае регулярного внесения навоза.

Применение навоза позволило также увеличить соотношение углерод : азот в почвах Мойштадта.

Упразднение азотного удобрения привело к сильному повышению содержания этого элемента в сухом веществе полученном от большинства культур севооборота, но не усилило образования органического вещества обедненного азотом, несмотря на увеличение выноса этого элемента урожаем.

REFERENCES

HOVDEN A. A., 1936. Kjemiske undersøkinger av jord på langvarige gjødslingsfelter. *Meld. St. forsøksg. Møystad*, 1-103.

IVERSEN K. OG DORPH-PETERSEN K., 1951. Forsøg med staldgødning og kunstgødning ved Askov 1894-1948. *Tidsskr. f. planteavl.*, **54**, 369-538.

JETNE M., 1974. Langvarige gjødslingsforsøk på Statens forskningsstasjon Møystad. *Forskn. fors. Landbr.*, **25**, 519-536.

LØVØ P. J., 1950. Langvarige gjødslingsforsøk. *Forskn. fors. Landbr.*, **1**, 239-286.

PEREPELITZA V. M., 1974. Role of organic and mineral fertilizers in humus formation. *Soviet Soil Sc.*, No. 2, 151-159.

RØNSEN K., 1965. Langvarige gjødslingsforsøk på Statens forsøksgard Møystad 1922-1963. *Forskn. fors. Landbr.*, **16**, 293-338.

SEMB G., SORTEBERG A., ØIEN A., 1959. Investigations on potassium available in soils varying in texture and parent material. *Acta. Agric. Scand.*, **9**, 229-252.

UHLEN G., 1956. Noen langvarige gjødslingsforsøk på Østlandet. *Forskn. fors. Landbr.*, **7**, 33-79.

UHLEN G. OG SEMB G., 1962. Sammenligning av AL-metoden og tidligere brukte metoder for kalium- og fosforanalyse i jordprøver fra forsøksfelter). *Forskn. fors. Landbr.*, **13**, 189-207.

VIGERUST E. OG RØNSEN K., 1965. Jordundersøkelser i langvarige gjødslingsforsøk på Statens forsøksgard Møystad. *Forskn. fors. Landbr.*, **16**, 339-365.

WARREN R. G., 1956. N, P, K residues from fertilizers and farmyard manure, in long-term experiments at Rothamsted. *Proc.*, No. 37. *The Fertilizer Society*, 33 p.

DISCUSSION GÉNÉRALE — GENERAL DISCUSSION

V. HERNANDO.

Question : Why did they not use applications of N in the experiments that you showed to us ?

J. KORKMAN.

Answer : That is a good question. I cannot answer it. I think that the value of the experiment is not diminishing of that reason.

Ph. GAUTIER.

Question : Is the Carex-peat soil studied rich in potassium ? or what is the origin of potassium for the crops in regard of the non-effect of potassium-fertilizer ?

J. KORKMAN.

Answer : Carex peat areas are very often originally formed on shallow waters which may be flooded every spring. Around the edges of the area the peat may also be in connection with the underlying mineral material. That may be the reason of a certain potassium mineralization capacity in carex peats as a group. But the main reason in this particular case is the claying of the test area in 1904 and 1941.

J. HÉBERT.

Question : Have you through other studies, any indications on the source of nitrogen in peat soils : mineralization from peat organic matter ? fixation of atmospheric nitrogen ? priming effect of fresh organic matter on peat organic matter nitrogen ?

J. KORKMAN.

Answer : The main part is coming from ammonification of the peat material. I don't think fixation of atmospheric nitrogen can be of any greater importance. The mineralization can be seen as a fairly rapid shallowing of the peat layer.

J. CARPENTIER.

Question : One of the areas where long term experiments are necessary is forest fertilization. Do such experiments exist in Norway or other Scandinavian countries ? Is it intended to conduct long term experiments on forest ?

S. L. JANSSON.

Answer : There are very few long-term experiments in Scandinavia. In Sweden one experiment on peat soil was started about 1916. The fertilizer used was wood ash which can be looked upon as a potassium fertilizer. The effects of the fertilizing

have been considerable ; on the fertilized plots there is now a forest stand ; on the controls there is no tree growth on this peat soil.

Long-term fertilizer experiments in forestry are equally important as in agriculture. At least they should cover the whole development time of a tree crop which is about 100 years in northern Scandinavia, 40-50 years in middle Europe.

H. MATSUO.

Question : Under the limited conditions of the pot experiment the spring wheat yields increased by years. What are the reasons for such increases in yields ? And, in the same time N and P uptakes also are increased. From what sources the crop could absorb such amounts of N and P ?

S. L. JANSSON.

Answer : During the first period of the experiment, 1949-1959, the soil was not fertilized ; during the second period, 1961-1969, 50 p. 100 NPK fertilization was used and during the third period, 1970-1974, 100 p. 100 NPK fertilization.

This increased nutrient application is the answer to your questions. But you can also observe that the nutrients were much better utilized by the crop when the soil was limed than when it was not.

2e SÉANCE — 2nd SESSION

COMMUNICATIONS SUR LES ESSAIS DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE INTÉRESSANT LES ROTATIONS DE CULTURES

PAPERS ON LONG-TERM FERTILISER TRIALS CONCERNING CROP ROTATIONS

Président de séance : Pr G. W. Cooke

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 567-582.

UTILISATION DES RÉSULTATS OBTENUS SUR DES ESSAIS DE LONGUE DURÉE DANS L'ÉTUDE DES TRANSFERTS DE L'AZOTE DANS LE SOL

R. MOREL
avec la collaboration technique de Thérèse LASNIER

Chaire de Physico-chimie et Science du sol,
I. N. A. Paris-Grignon,
78850 Thiverval-Grignon

RÉSUMÉ

Les transferts de l'azote dans les sols différemment traités d'un dispositif d'essais de longue durée sont étudiés par l'application d'une équation relative à l'évolution dans le temps de la quantité d'azote organique du sol. Cette équation tient compte des quantités d'azote minéral et organique incorporées au sol d'une part, des processus de minéralisation et de réorganisation d'autre part.

Les points suivants sont dégagés :

— les processus d'organisation * de l'azote minéral apporté et de réorganisation ** de l'azote minéralisé jouent un rôle considérable dans l'entretien du taux d'azote organique du sol ; ils dépendent étroitement des quantités d'azote et de carbone incorporés au sol ;

— dans le cas d'un apport faible d'azote, la proportion de l'azote minéralisé qui se réorganise est la plus élevée, ce qui a pour résultat une limitation des exportations d'azote par les récoltes et des pertes propres du sol : le taux net annuel de minéralisation est bas.

Par ailleurs, il semble dans ce traitement que la micro-population s'alimente de façon prioritaire vis-à-vis des racines ; cette observation conduirait à admettre, pour les faibles taux d'azote, des seuils nutritifs différents pour les racines et les micro-organismes.

— En présence de quantités limitées de carbone et malgré des apports normaux d'azote minéral, le coefficient de réorganisation est relativement faible.

— Le fumier employé seul (10 000 kg/ha/an) n'assure pas le maintien du taux actuel d'azote organique du sol ; la proportion d'azote réorganisée est du même ordre que dans le cas des parcelles ne recevant que des engrais minéraux. Par contre, une addition très modérée d'azote minéral à l'apport de fumier augmente le coefficient de réorganisation et, abaissant le taux net annuel de minéralisation, permet une augmentation du taux d'azote organique du sol ; le fumier apparaît ici comme dispensateur de substances énergétiques à la micro-population.

organisation

* N. min. apporté (NH_4^+, NO_3^- ...) ⟶ N organ. vivant (racines, micro-organismes).

réorganisation

** NH_4^+, NO_3^- issu de N organ. non vivant ⟶ N organ. vivant (racines, micro-organismes).

Nous nous proposons dans cette étude d'utiliser les résultats obtenus sur le dispositif Dehérain pour ouvrir une voie de recherche sur les processus complexes relatifs aux transferts de l'azote dans le sol. La description du dispositif et des divers

TABLEAU I

Évolution des taux d'azote organique du sol (parcelles cultivées)

Traitements	Taux d'azote p. 1 000 de terre sèche						Variations annuelles p. 100 d'azote initial			Taux de minéralisation nets annuels
	1938	1952	1962	1964	1966	1972	1964-1972	1966-1972	1938-1972	
Sans engrais depuis 1875 A	1,30	1,18	1,14			1,06			— 0,53	0,60
Sans engrais depuis 1875 G				1,33		1,29	— 0,37			0,46
Sans engrais depuis 1902	1,40	1,31	1,23			1,16			— 0,51	0,57
Sans engrais depuis 1931	1,79	1,54	1,42			1,30			— 0,80	0,84
NPK depuis 1902	1,50	1,38	1,38			1,30			— 0,40	1,06
NPK depuis 1967/SE depuis 1902 ...					1,22	1,20		— 0,21		1,39
NK sans P depuis 1929	1,58	1,44	1,41			1,31			— 0,50	1,12
PK sans N depuis 1929	1,65	1,44	1,36			1,28			— 0,66	0,71
NP sans K depuis 1929	1,70	1,52	1,44			1,36			— 0,59	1,15
Fumier seul depuis 1929	1,66	1,62	1,57			1,47			— 0,34	1,08
Fumier + NPK depuis 1965				1,34		1,40	+ 0,53			1,15

traitements qu'il comporte a été présentée dans un précédent article (MOREL, CHABOUIS et BOURGEOIS, 1976). Nous donnerons tout d'abord des indications générales sur l'évolution des taux d'azote organique du sol dans les différents cas puis nous aborderons la démarche méthodologique évoquée ci-dessus.

Les taux d'azote et de carbone organiques du sol ont été déterminés sur des échantillons de sol prélevés en 1938, 1952, 1962 et 1972 sur chacune des parcelles du champ d'essais : utilisation de la méthode de Kjeldahl pour l'azote, de la méthode de ANNE (1945) pour le carbone (oxydation bichromique en milieu sulfurique). Les résultats des dosages de l'azote organique sont reproduits dans le tableau 1. Précisons qu'à l'époque de l'implantation du dispositif, un dosage d'azote, réalisé pour l'ensemble du champ, situait le niveau de cet élément à 2,06 p. 1 000.

En marge de ces résultats, rapportons que les taux de carbone organique se situent selon les traitements, entre 9,6 et 14,3 p. 1 000, le rapport C/N demeurant toujours dans des limites étroites, au voisinage de 9 pour l'ensemble des parcelles.

1. — OBSERVATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉVOLUTION DES TAUX D'AZOTE ORGANIQUE DU SOL

Les taux d'azote ont subi depuis la création du champ et depuis 1938 des diminutions importantes sur l'ensemble des parcelles sauf dans celles, nouvellement établies, recevant une fumure organique et minérale (tabl. 1). Le taux de diminution annuelle est le plus élevé pour les traitements sans engrais depuis 1931 et sans fumure azotée depuis 1929. Il est le plus faible dans les parcelles sans engrais depuis 1875 sous gazon et dans les parcelles ne recevant que du fumier d'étable ; dans ce dernier cas, l'abaissement du taux d'azote paraît surprenant, mais rappelons que les résidus aériens des récoltes sont éliminés.

Cette diminution générale du taux d'azote organique et, par là, du taux de matière organique, appelle des commentaires. Il traduit le fait que la quantité d'azote organique qui se forme au sein même de la masse du sol, éventuellement complétée par des apports (fumier), demeure inférieure à la quantité qui se détruit pendant le même temps. Il en résulte un fléchissement du taux d'azote du sol dont les causes sont à rechercher dans les caractéristiques des traitements concernés. Dans une première analyse, nous pouvons observer que les traitements réalisés selon le cas ne satisfont pas à l'une des deux conditions :

— la nécessité d'un apport d'azote suffisant pour assurer l'édification d'une quantité de substances organiques permettant au moins d'atteindre un équilibre azoté. La fertilisation au fumier d'étable seul, notamment, ne couvre pas cet apport : les pertes (récoltes, pertes propres du sol) excèdent les gains ; le taux de matière organique s'abaisse bien que le fumier contienne une certaine proportion de substances organiques humifiées.

— La présence dans le sol d'une quantité suffisante de substances organiques carbonées, provenant des masses racinaires et des apports au sol, susceptible de satisfaire :

- Aux besoins structuraux de formation des substances humiques qui constituent l'essentiel de la matière organique stable du sol.

• Aux besoins énergétiques de la micropopulation qui participe dans une large mesure à l'élaboration de ces mêmes substances humiques.

Une déficience en carbone peut dès lors conduire à une inutilisation d'une fraction de l'azote du sol qui se trouve de ce fait exclue de la genèse des substances humiques. Excepté pour les traitements au fumier de ferme, l'ensemble des parcelles est approvisionné d'une façon déficitaire en carbone du fait de l'élimination des pailles et des verts de betteraves. Il en résulte un facteur permanent d'abaissement du taux d'azote du sol.

Une approche différente consiste en une évaluation des taux de minéralisation nets annuels de l'azote organique pour les différents traitements. La détermination en est difficile et une estimation grossière peut en être faite de la façon suivante : la diminution de la quantité d'azote organique pendant la période considérée est égale à la perte constatée sur le sol majorée des apports éventuels d'azote organique et des quantités organisées dans la masse du sol aux dépens de l'azote minéral incorporé. Cette dernière valeur est inconnue ; une approximation peut en être donnée en admettant que le coefficient d'utilisation par la plante de l'azote minéral apporté est de l'ordre de 50 p. 100 ; la fraction complémentaire est supposée organisée, les pertes étant vraisemblablement faibles.

Les taux nets de minéralisation ainsi calculés sont les plus bas pour les parcelles sans aucune fertilisation ou recevant une fumure minérale sans azote (PK) ; ils se situent entre 0,5 et 1 p. 100. Les parcelles recevant une fertilisation minérale et organique accusent des taux nettement plus élevés, supérieurs à 1 p. 100 (tabl. 1, colonne 11).

Cette démarche, loin d'être sans critique, ne donne par ailleurs aucun élément de réponse en ce qui concerne deux des facteurs essentiels de l'évolution de la quantité d'azote organique du sol : l'importance de la minéralisation réelle de l'azote organique d'une part, l'ampleur de l'organisation et de la réorganisation de l'azote minéral dans les masses racinaires et la micropopulation du sol, d'autre part.

Nous nous proposons, dans ce qui suit, d'apporter une réponse partielle à la question posée.

2. — MODÈLE DE RÉFÉRENCE PROPOSÉ

Ce modèle, déjà décrit (MOREL, 1969) représente un schéma très simplifié des transferts de l'azote dans le sol (fig. 1).

La couche arable du sol est divisée en deux compartiments : le compartiment 1 qui comprend la fraction azotée organique vivante du sol (racines, micropopulation), le compartiment 2 représentant l'ensemble des substances azotées non vivantes du sol ; dans la réalité, ces deux compartiments sont étroitement imbriqués. Les apports au sol d'azote minéral M et d'azote organique O se distribuent selon les flèches tracées sur la figure ; les lettres désignent les quantités d'azote mises en jeu dans l'unité de temps considérée, le sol étant ici supposé homogène et en équilibre azoté. Par ailleurs, au cours de l'unité de temps, les quantités d'azote qui se fixent sur la fraction minérale sont considérées égales aux quantités libérées. Nous admettons enfin que les gains par fixation non symbiotique compensent les pertes par dénitrification.

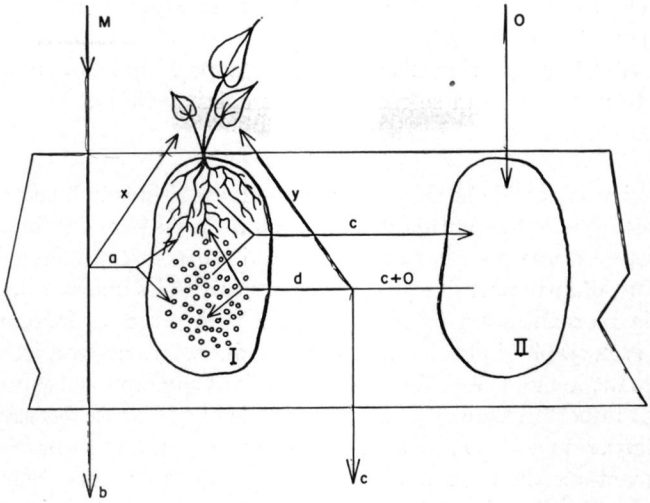


FIG. 1.

a : fraction de M organisée par les racines et les micro-organismes ; *b* : fraction de M perdue (drainage, dénitrification) ; *c* : azote des racines et des micro-organismes morts ; *d* : fraction de l'azote minéralisé (C + O) réorganisée par les racines et les micro-organismes ; *e* : fraction de l'azote minéralisé perdue (drainage, dénitrification).

Nous pouvons définir, sur ce modèle, les grandeurs caractéristiques suivantes, l'année moyenne d'une rotation représentant l'unité de temps :

— le taux réel annuel de minéralisation $\alpha = \frac{c + O}{N}$,

— le taux annuel de réorganisation $\beta = \frac{d}{N}$

— le taux net annuel de minéralisation $\gamma = \alpha - \beta$.

La quantité N d'azote organique devrait correspondre à la seule fraction organique non vivante du sol. En fait, il est impossible de séparer analytiquement les fractions vivantes et non vivantes ; N désigne donc la quantité totale d'azote organique du sol, ce qui entraîne une erreur systématique difficilement évitable.

3. — ÉVOLUTION DE LA QUANTITÉ D'AZOTE DU SOL, INTERPRÉTATIONS GRAPHIQUES

Nous référant au modèle décrit, il est possible d'établir une relation générale exprimant l'évolution dans le temps de la quantité d'azote de la couche arable du sol (4). Il suffit de définir un bilan de l'azote dans l'unité de temps et d'accepter l'hypothèse que la racine et le micro-organisme ne font aucune distinction entre l'azote minéral apporté au sol et l'azote minéralisé. La relation trouvée est la suivante:

$$N = \frac{O + \omega M}{\alpha(1 - \omega)} + \left[N_0 - \frac{O + \omega M}{\alpha(1 - \omega)}\right] \exp - \alpha(1 - \omega)\, t \qquad (1)$$

N exprime la quantité d'azote de la couche arable du sol au temps t, N_0 la quantité d'azote pour $t = 0$.

ω représente la proportion d'azote minéral apporté qui s'organise et la proportion de l'azote minéralisé qui se réorganise dans les racines et la micropopulation ; $\omega = \frac{\beta}{\alpha}$.

L'expression (1) est de la même forme que les relations habituellement utilisées pour rendre compte de l'évolution de l'azote ou de la matière organique du sol. Mais elle tient compte d'une part des deux formes d'azote susceptibles d'être apportées au sol (O et M), d'autre part des deux processus successifs que sont la minéralisation (taux α) et la réorganisation (coefficient ω). α varie avec les facteurs de l'activité microbienne et la stabilité plus ou moins grande des substances organiques. La variation de ω, quant à elle, relève de plusieurs actions qui sont notamment : l'activité microbienne, l'importance du système racinaire, le taux d'azote des racines, l'ampleur des pertes d'azote du sol... Il apparaît dès lors que O, M, α et ω représentent les facteurs fondamentaux du taux d'azote organique du sol ; aussi leur considération devient-elle de première importance dans l'analyse des processus simultanés qui commandent les multiples transferts de l'azote dans le sol. Dans ce qui suit, nous développerons les interprétations que nous pouvons déduire de l'utilisation de la relation (1) pour les différents traitements du dispositif Dehérain. Soulignons qu'il en sera ici comme dans le cas de toute équation procédant d'hypothèses : les enseignements dégagés ne font que refléter les conséquences de ces hypothèses qu'il nous appartient de toujours juger par une confrontation avec les faits expérimentaux observés.

Pour un traitement donné du sol, N_0, O, M et t sont connus ; N n'est alors fonc-

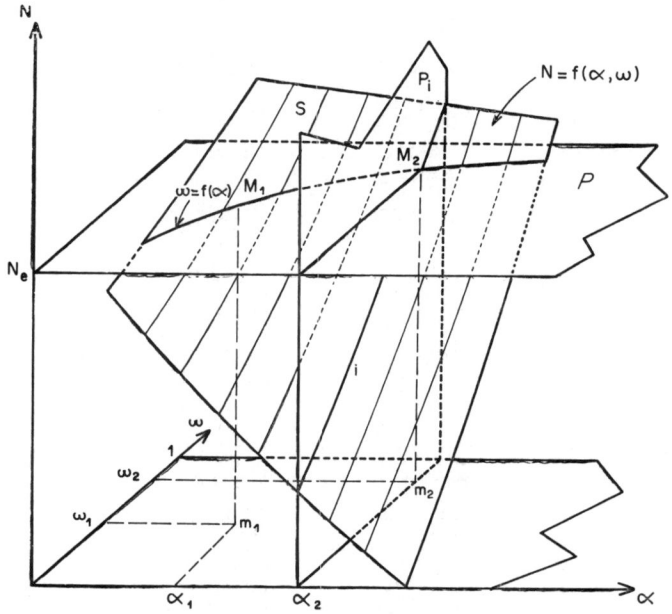


FIG. 2.

tion que de α et de ω : $N = f(\alpha, \omega)$; cette équation est celle d'une surface qui coupe selon un graphe $\omega = f(\alpha)$ le plan P, de cote N et parallèle au plan des α, O, ω (fig. 2). Ce graphe, caractéristique du sol étudié, montre que la valeur N trouvée expérimentalement peut être obtenue par une infinité de couples (α, ω) ; mais nous pouvons penser qu'un seul de ces couples (α_1, ω_1) correspond au sol concerné pour la période considérée ; l'évaluation de α et de ω permettrait pour cette période d'évaluer l'importance des transferts d'azote dans le sol. Malheureusement, les difficultés qui s'attachent à cette détermination sont loin d'être levées. Toutefois, la considération des graphes $\omega = f(\alpha)$ ou des graphes dérivés tels que $\gamma = f(\alpha)$ ou $\beta = f(\alpha)$, caractéristiques des différents traitements, offrent d'utiles éléments de compréhension quant aux résultats relevés sur le dispositif expérimental.

4. — GRAPHES $\omega = f(\alpha)$

L'ensemble des graphes $\omega = f(\alpha)$ correspondant aux divers types de parcelles, reproduit sur la figure 3, suggère des observations de deux ordres :

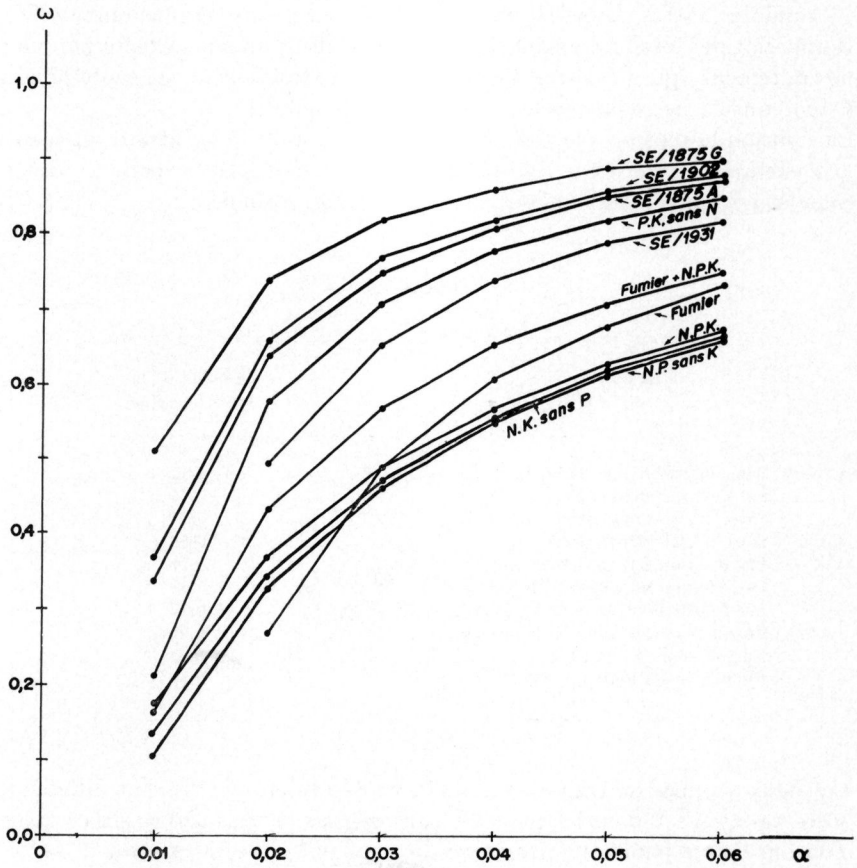


FIG. 3. — *Graphes* $\omega = f(\alpha)$

— Tout d'abord une réflexion sur le sens de variation de ω en fonction d'un accroissement $\Delta\alpha$ de α. La référence à cette variation peut paraître sans objet puisque nous avons postulé qu'un seul couple $(\alpha_1 \omega_1)$ convenait pour chacun des traitements au cours d'une période plus déterminée. Cependant, il est raisonnable de penser que les valeurs de α et de ω ne demeurent pas fixes pendant toute la durée de cette période, mais varient plus ou moins autour de la valeur moyenne $(\alpha_1 \omega_1)$; à titre d'exemple, ces valeurs diffèrent sans aucun doute selon les saisons. Nous pouvons dès lors suggérer que l'allure des graphes renseigne quant à l'incidence d'une variation $\Delta\alpha$ de la quantité d'azote minéralisé sur l'importance de la réorganisation (ω) ; cette remarque est également valable pour les graphes dérivés $\gamma = f(\alpha)$ et $\beta = f(\alpha)$.

Pour tous les graphes $\omega = f(\alpha)$, à un accroissement $\Delta\alpha$ de α correspond une augmentation de ω, ce qui semble bien corroborer ce que nous pouvons penser être la réalité : une minéralisation plus importante est le fait d'une activité microbienne plus grande, liée à la présence d'une masse plus élevée de micro-organismes.

Par ailleurs, les graphes se distinguent par leurs positions relatives. Deux groupes se dégagent nettement :

— celui des parcelles sans engrais et sans apport d'azote pour lesquelles la fraction réorganisée est la plus importante ;

— celui des autres parcelles, que caractérise une valeur ω plus faible.

Il apparaît dès lors intéressant de déterminer une grandeur caractéristique pour chaque traitement, qui préciserait l'importance de la fraction ω de l'azote minéralisé qui se réorganise ; deux démarches peuvent être conduites :

La solution la plus simple consiste à choisir un taux α arbitraire et plausible, 0,03 par exemple, et de noter les valeurs correspondantes de ω pour les différents traitements. Le tableau suivant rapporte les résultats trouvés :

TABLEAU 2

Traitements	Valeurs de ω pour $\alpha = 0{,}03$
Sans engrais depuis 1875 G	0,82
Sans engrais depuis 1875 A	0,75
Sans engrais depuis 1902	0,77
Sans engrais depuis 1931	0,66
Fertilisation PK sans N depuis 1929	0,71
Fertilisation minérale NPK depuis 1902	0,49
Fertilisation NK sans P depuis 1929	0,47
Fertilisation NP sans K depuis 1929	0,46
Fumier seul depuis 1929	0,49
Fumier + NPK depuis 1964	0,57

Les deux groupes de traitements reflètent des valeurs nettement différenciées : de l'ordre de 0,7 à 0,8 pour les parcelles sans engrais et sans azote, elles s'abaissent aux environs de 0,5 pour les autres parcelles.

Toutefois, ce critère simple n'est pas décisif : en effet, le taux de minéralisation

réel, α, est vraisemblablement différent pour les diverses catégories de parcelles ; les comparaisons peuvent alors dans certains cas prêter à des conclusions douteuses.

Un autre critère est donc à rechercher, indépendant de α, et qui peut être trouvé par la démarche suivante :

D'après la façon dont ils ont été établis, les graphes $\omega = f(\alpha)$ représentent une équation à terme exponentiel de la forme

$$\omega = 1 - e^{-k\alpha} \tag{2}$$

k désignant une constante. Cette forme est homologue de l'équation de MITSCHERLICH ; utilisée pour exprimer l'importance du développement végétal en fonction de l'un de ses facteurs choisi comme variable, cette équation peut également être rattachée aux expressions classiques de la cinétique chimique.

Dans le cas présent, cette homologie se traduit par la relation

$$\frac{d\omega}{d\alpha} = k(1 - \omega) \tag{3}$$

dont l'intégration conduit précisément à l'équation (2). La relation (3) traduit l'hypothèse que l'augmentation $d\omega$ pour un accroissement $d\alpha$ est proportionnelle à l'augmentation de ω restant possible.

Dans la loi de MITSCHERLICH, k désigne le « coefficient d'efficacité » du facteur choisi comme variable ; il indiquerait ici le « coefficient d'efficacité de l'azote minéralisé » quant à la réorganisation de celui-ci dans les racines et les micro-organismes. Représentant la tangente à l'origine, indépendant de α, k devient une grandeur caractéristique de chacun des traitements du dispositif ; il se déduit de la relation (2) appliquée aux valeurs expérimentales et permet de tracer des graphes théoriques qui peuvent être comparés aux graphes de la figure 3.

Voici les valeurs de k pour les différents traitements du dispositif Dehérain (tabl. 3). Elles se situent entre 34 et 54 pour les traitements sans apports d'azote, de 20 à 27 pour les autres parcelles.

TABLEAU 3

Traitements	Valeur de k
Sans engrais depuis 1875 A	44
Sans engrais depuis 1875 G	54
Sans engrais depuis 1902	44
Sans engrais depuis 1931	34
NPK depuis 1902	22
NPK depuis 1967/SE depuis 1902	22
NK sans P depuis 1929	20
PK sans N depuis 1929	39
NP sans K depuis 1929	20
Fumier seul depuis 1929	21
Fumier + NPK depuis 1965	27

5. — GRAPHES $\gamma = f(\alpha)$ et $\beta = f(\alpha)$

Dérivés des graphes précédents, ces graphes sont représentés sur les figures 4 et 5.

Rappelons tout d'abord une remarque : le taux net annuel de minéralisation γ représente aussi le pourcentage de la quantité N d'azote qui alimente les parties aériennes des récoltes et les pertes du sol ; ces dernières sont généralement peu élevées dans le complexe pédo-climatique sur lequel est implanté le dispositif Dehérain.

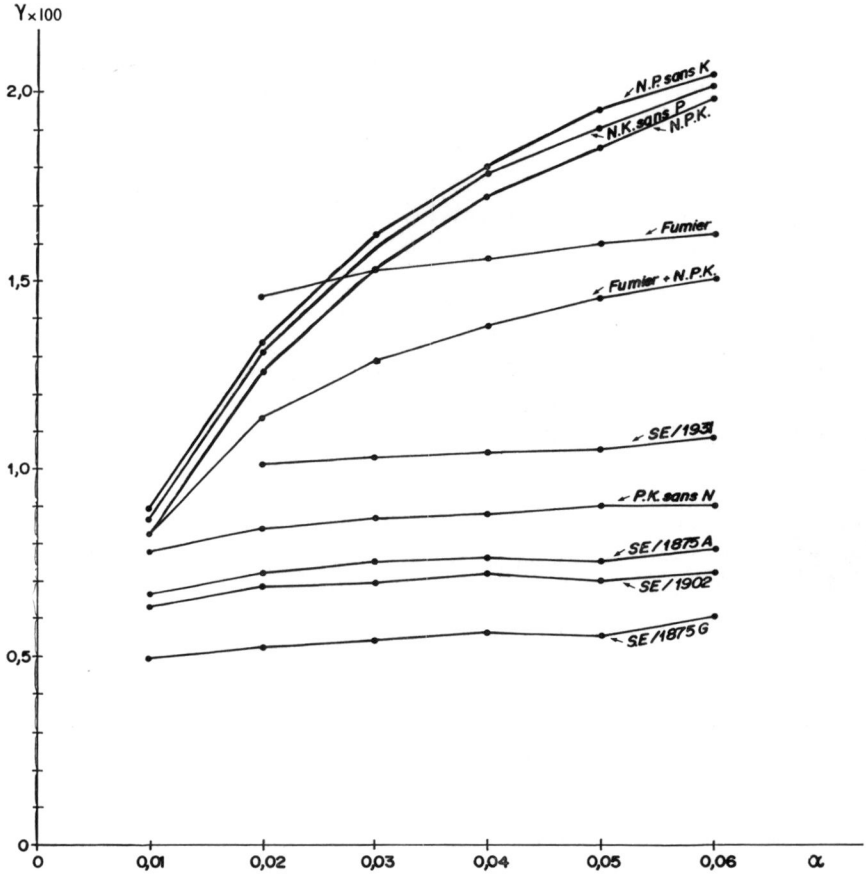


FIG. 4. — *Graphes* $\gamma = f(\alpha)$

Les graphes $\gamma = f(\alpha)$ offrent en fonction de leur pente une double indication :

Graphes à pente voisine de zéro

Ils sont observés pour les traitements très déficients en azote : parcelles sans engrais, parcelles recevant une fertilisation minérale sans azote. Cette faible variabilité de γ lorsque α augmente suggère deux réflexions :

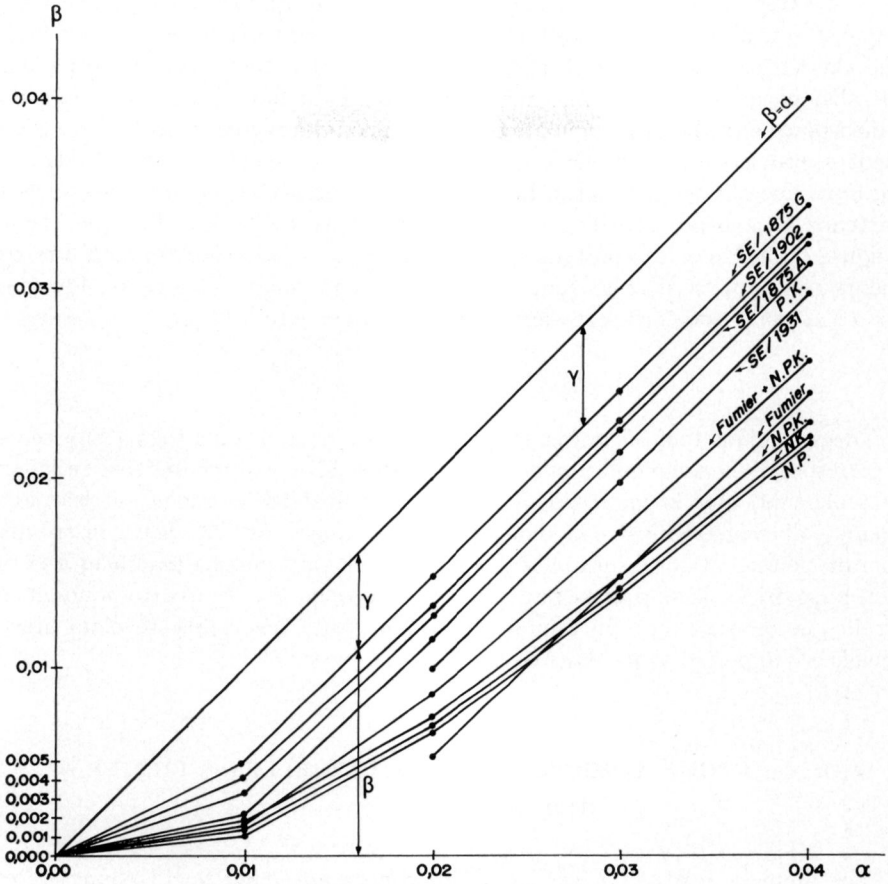


FIG. 5. — *Graphes* $\beta = f(\alpha)$

— Le taux γ, demeurant sensiblement constant quel que soit α, peut être considéré comme la vraie valeur du taux net annuel de minéralisation. Le tableau 4 précise les valeurs observées, ainsi que le temps de « turn over » défini par la relation $t = \frac{1}{\gamma}$.

TABLEAU 4

Traitements	Valeurs de $\gamma \times 100$	Temps de « Turn Over » en années
Sans engrais depuis 1875 G	0,54	184
Sans engrais depuis 1875 A	0,74	138
Sans engrais depuis 1902	0,69	145
Sans engrais depuis 1931	1,04	96
Fertilisation PK sans N depuis 1929 ..	0,86	116

— La très faible variabilité de γ en fonction de α signifie que la part de l'azote minéralisé qui alimente la récolte et les pertes demeure pratiquement constante ; mais cela indique également que, cette part étant assurée, toute quantité ΔN d'azote minéralisé correspondante à une augmentation $\Delta\alpha$ du taux réel de minéralisation est incorporée dans la micropopulation, à l'exclusion des racines ; en effet, si celles-ci étaient approvisionnées supplémentairement, γ augmenterait. On observe dans ces conditions une alimentation prioritaire des micro-organismes, ce qui laisse supposer l'existence d'un seuil nutritif azoté différent pour ces derniers et pour les racines. La figure 5 illustre ce comportement : les graphes $\beta = f(\alpha)$ correspondant aux traitements sans apport d'azote sont parallèles à la première bissectrice ; lorsque le taux α s'accroît, γ demeure constant alors que β augmente.

Graphes à pente positive

Observés dans tous les autres traitements, ils montrent qu'à tout accroissement $\Delta\alpha$ correspond une augmentation de γ : la quantité ΔN d'azote minéralisé se répartit non seulement dans la micro-population mais aussi dans les racines et les parties aériennes du végétal ainsi que dans les pertes propres du sol ; cette distribution apparaît clairement sur les graphes $\beta = f(\alpha)$ qui ne sont plus ici parallèles à la première bissectrice. Remarquons toutefois que le graphe $\gamma = f(\alpha)$ correspondant aux parcelles ne recevant que du fumier accuse une pente très faible, révélant ainsi la déficience d'apport d'azote dans ce traitement.

6. — ÉTUDE COMPARATIVE DES PARCELLES « FUMIER », « FUMIER + NPK » ET « NPK »

Les données relatives à ces parcelles, concernant leurs fertilisations et leurs rendements, sont les suivantes :

TABLEAU 5

Traitements	Azote apporté par ha/an				Rendements en q/ha (1970-1975)		
	Pluies	Apports d'azote minéral	Apports d'azote organique	Total	Blé		Betterave
					Grain	Paille	
Fumier seul	7	8	47	62	26,4	38,5	337
Fumier + NPK	7	40	47	94	30,1	39,7	358
Fertilisation minérale NPK	7	87		94	32,8	39,3	358

Nous avons estimé que le fumier contenait en moyenne 15 p. 100 d'azote minéral sous forme ammoniacale. Remarquons sur le tableau 5 que les apports minéraux et organiques sont égaux pour les parcelles « fumier + NPK ». Rappelons que la dimi-

nution du taux d'azote du sol est sensiblement la même pour les parcelles « fumier » et « NPK » ; par contre, ce taux augmente pour les parcelles « fumier + NPK », bien que le complément minéral azoté ajouté au fumier soit très modéré (30 kg/ha environ annuellement) (tabl. 1).

Les graphes $\omega = f(\alpha)$ et $\gamma = f(\alpha)$ suggèrent une interprétation de ces différences : les valeurs de ω et de k sont voisines et parmi les plus faibles pour les deux premiers types de traitements ; elles sont nettement plus élevées pour les parcelles « fumier + NPK » (tabl. 3) ; il en résulte pour ces dernières parcelles une diminution du taux net annuel de minéralisation γ, permettant le redressement du taux d'azote organique du sol.

L'origine des faibles valeurs de ω et de k pour les parcelles « fumier » et « NPK » relève des deux causes évoquées au début de ce mémoire : déficience en azote pour les premières, déficience en carbone pour les secondes. Lorsqu'un complément azoté est ajouté au fumier, l'accroissement de ω est dû en premier lieu à l'augmentation de la masse racinaire que l'on peut estimer sensiblement égale à celle des parcelles « NPK » (rendements voisins, tabl. 2). Mais cette forme de réorganisation est loin d'être suffisante pour expliquer le relèvement très net du taux d'azote du sol alors que ce taux continue à s'abaisser dans les parcelles ne recevant que du fumier. Aussi devons nous admettre que, grâce au potentiel énergétique carboné apporté par le fumier, la réorganisation se situe pour une large part au niveau d'une prolifération microbienne.

Ainsi, l'entretien du taux d'azote organique du sol demeure-t-il étroitement lié, non seulement aux possibilités d'organisation de l'azote minéral apporté, mais aussi à la réorganisation de l'azote minéralisé ; ces deux transferts sont sous la dépendance du coefficient ω. Conjointement à celui de fournisseur d'azote et en présence d'une fertilisation normale, le rôle du fumier apparaît tout autant comme pourvoyeur de substances énergétiques que dans l'apport de composés humiques ; rien ne permet d'ailleurs d'affirmer que ces derniers ne sont pas, pour une part peut-être importante, utilisés comme dispensateurs d'énergie à la micropopulation du sol.

Reçu pour publication en mai 1976.

SUMMARY

UTILIZATION OF THE RESULTS OF LONG-TERM EXPERIMENTS IN THE STUDY OF NITROGEN TRANSFERS IN SOIL

Nitrogen transfers in the differently treated plots of a long-term experiment were studied by means of an equation expressing the fluctuations with time of the amount of organic nitrogen in soil. This equation takes into account the amounts of inorganic and organic nitrogen added to the soil on the one hand, and the mineralization and « reorganization » processes on the other hand.

Following conclusions could be drawn :

— The « organization (*) » processes of the added mineral nitrogen and the « reorganization (**) » processes of mineralized nitrogen play a dominant part in the maintenance of the organic nitrogen content of soil ; they are closed dependant on the amounts of nitrogen and carbon added to the soil.

(*) « Organization » : Nmin. supplied (NH_4^+, NO_3^-...) → N org. in life (roots, microorganisms).

(**) « Reorganization » : Nmin. (NH_4^+, NO_3^-) from non living N org. → N org. in life (roots, microorganisms).

— If only very low amounts of nitrogen are brought to the soil, the greatest part of mineralized nitrogen undergoes « reorganization », which results in limited nitrogen removals through crops and in limited losses through the soil : a low yearly rate of mineralization occurs.

Besides, according to this treatment, the microorganisms appear to feed prior to roots ; this observation would lead us to admit the existence of different nutrition thresholds for roots and for microorganisms in case of low nitrogen percentage.

— If only restricted amounts of carbon are left in the soil, even if normal amounts of mineral nitrogen are added, the « reorganization » rate will be comparatively low.

— Through addition of farmyard manure alone (10 000 kg yearly per ha), the present rate of organic nitrogen cannot be maintained in the soil ; the percentage of « reorganization » nitrogen is the same as in the plots treated with mineral fertilizers only. On the contrary, the addition of moderate amounts of mineral nitrogen, together with farmyard manure, increases the « reorganization » rate and, through a reduction in the yearly net rate of mineralization, leads to a higher rate of organic nitrogen in soil ; farmyard manure here appears to supply energetic substances to the microorganisms.

ZUSAMMENFASSUNG

ANWENDUNG DER IN LANGFRISTIGEN VERSUCHEN ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR DIE UNTERSUCHUNG DER STICKSTOFFTRANSPORTE IM BODEN

Die Sticks tofftransporte in den verschiedenartig behandelten Böden einer langfristigen Versuchsanlage sind mit der Anwendung einer Gleichung untersucht, welche die Entwicklung des Bodengehalts an organischem Stickstoff mit der Zeit betrifft. Diese Gleichung berücksichtigt die im Boden aufgenommenen Mengen mineralisches und organisches Stickstoffs einerseits und die Mineralisierungs- und Reorganisationsprozesse anderseits.

Die folgenden Tatsachen sind herausgestellt :

— Die Organisationsprozesse des zugeführten mineralischen Stickstoffs und die Reorganisationsprozesse des mineralisierten Stickstoffs spielen eine bedeutende Rolle in die Erhaltung des Bodengehalts an organischem Stickstoff ; sie sind mit den im Boden aufgenommenen Stickstoff- und Kohlenstoffmengen eng verbunden.

— Im Falle einer sehr geringen Stickstoffzufuhr reorganisierte sich der grösste Teil des mineralisierten Stickstoffs, was zur Beschränkung der Stickstoffaufnahme durch die Ernten und der für den Boden charakteristischen Verluste führt : der jährliche Nettomineralisierungssatz ist gering.

In dieser Behandlung scheint es dazu dass die Mikroorganismenernährung den Vorzug vor der Wurzelernährung hat ; diese Tatsache wurde zu der Annahme führen dass es, für die geringen Stickstoffgehalte, abweichende Nährschwellen für die Wurzel und die Mikroorganismen gibt.

— In Anwesenheit von beschränkten Kohlenstoffmengen und trotz normaler Zufuhr von mineralischem Stickstoff ist der Reorganisationssatz verhältnismässig gering.

— Der allein zugeführter Mist (10 000 kg pro Ha und Jahr) gewährleistet nicht die Erhaltung des vorstehenden Bodengehalts an organischem Stickstoff ; der Teil reorganisiertes Stickstoffs gleicht dem auf mit auschliesslich Mineraldüngern angereicherten Parzellen. Dagegen erhöht ein sehr geringer Zusatz vom mineralischen Stickstoff zur Mistgabe den Reorganisationssatz und ermöglicht eine Steigerung des Bodengehalts an organischem Stickstoff, indem es den jährlichen Nettomineralisierungssatz verringert ; der Mist erwies sich hier als Austeiler von Kraftstoffen für die Mikroorganismen.

(*) Organisation : zugeführter mineralische N (NH_4^+, NO_3^-...) → lebendiger organische N (Wurzeln, Mikroorganismen).

(**) Reorganisation : mineralischer N (NH_4^+, NO_3^-) aus nicht lebendigen organischen N stammend → lebendiger organische N (Wurzeln, Mikroorganismen).

РЕЗЮМЕ

Применение результатов долгосрочных опытов при изучении перемещений азота в почве.

Р. МОРЕЛЬ.

В различно обрабатывавшихся почвах, выделенных из диспозитива долгосрочных опытов, проводилось изучение перемещений азота, с применением формулы эволюции количеств органического азота почвы, во времени. Формула эта принимаетво внимание как количества минерального и органического азота внесенные в почву, так и процессы минерализации и реорганизации.

Выделены были следующие пункты :

— Процессы распределения внесенного минерального азота, и перераспределения минерализованного азота, играют огромную роль в поддержании уровня содержания органического азота в почве; они находятся в тесной зависимости от внесенных количеств азота и углерода.

— При внесении очень малых количеств азота, пропорция минерализированного и перераспределенного азота наиболее велика, что и вызывает ограничение экспорта этого элемента урожаями, и потери его почвой : в данном случае чистый процент минерализации — низок.

— Кроме того, при такого рода обработке, питание микро-популяции становится, как кажется, первоочередным по отношению питания корней; а это наблюдение заставляет допустить существование разных порогов питания для корней и для микроорганизмов, при небольших содержаниях азота.

— Коэффициент перераспределения остается относительно небольшим в присутствии ограниченных количеств углерода, даже при внесении нормальных количеств азота.

— Применение одного только навоза (10 000 кг/га в год) не обеспечивает поддержание уровня содержания органического азота в почве; в этом случае пропорция перераспределенного азота также велика, как и в делянках получавших только минеральные подкормки. И, напротив, очень скромные добавления минерального азота ко внесенному навозу, увеличивают коэффициент перераспределения и, уменьшая годичный процент минерализации, приводят к увеличению содержания органического азота в почве; здесь, навоз служит как-бы раздатчиком энергетических веществ микро-популяциям.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

MOREL R., CHABOUIS C., BOURGEOIS S., 1976. Quelques résultats expérimentaux obtenus sur le champ Dehérain. *Colloque international sur les essais de fertilisation de très longue durée et leurs enseignements. Ann. agron.*, **27** (5-6).

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, 161-172.

MOREL R., 1969. Essai de déterminations quantitatives relatives à l'évolution de l'azote dans un sol cultivé en équilibre azoté. *Ann. agron.*, 161-181.

MOREL R., 1971. Évolution dans le temps de la quantité d'azote organique du sol. *Science du Sol* n° 1, 121-129.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 583-610.

ASKOV 1894 : FERTILIZERS AND MANURE ON SANDY AND LOAMY SOILS

A. DAM KOFOED and O. NEMMING

Askov Forsøgsstation,
6600 Vejen (Danemark)

SUMMARY

Experiments on sandy loam and light sandy soil in Askov 1894-1972, comparing the effect of farmyard manure (F.Y.M.) and artificial fertilizer (NPK), have shown a better yield effect of NPK than of F.Y.M., when the same amounts of plant nutrients were supplied from the two types of fertilizer.

Depletion plots showed the necessity of supplying all three nutrients N, P and K to get maximum yields. Yield was always limited by the absence of added N. In its presence, P was limiting in the loam field and K in the sand field.

Soil analyses of the depletion plots gave increasing phosphorus and potassium indices while yields declined.

The humus content in soil evidently decreased during the years especially in the sand field. The explanation could be a dilution with soil following increasing intensity, especially in regard to depht of soil cultivation.

INTRODUCTION

The long-term field experiments in *Askov loam* and *Askov sand* were established in 1894 and are therefore the oldest current series of field experiments in Denmark.

The background for this investigation was the introduction into Danish agriculture of artificial fertilizers. This gave rise to many questions, among them that of maintaining the productivity of the soil by exclusive use of mineral fertilizer in which only inorganic salts are provided, whereas farmyard manure (FYM) supplies organic materials also. The supply of organic material was thought to be important for maintaining the humus content and the structure of the soil.

The main purpose of the experiments was and remains to compare the value of mineral fertilizers (NPK) and animal manures (FYM) ; to investigate the effect of the separate added plant nutrients on plant production ; and to examine their effects on the release of nutrients from soil.

The experiments supply important information about the humus content in

the soils after the different long-term equivalent treatments on different plots, and in addition, much-needed data on the uptake of plant nutrients in crops grown on unmanured and on fertilized plots.

Finally investigations may be made on the accumulation of heavy metals and other elements in soils and crops following the use or omission of FYM and of different fertilizers.

SOIL CONDITIONS

Askov loam field has a clay content increasing from 11 p. 100 in the 0-20 cm topsoil to 24 p. 100 in subsoil 50-100 cm. The soil is drained down to 125 cm.

Askov sand field has rather fine sand with a clay content decreasing from 4 p. 100 in 0-20 cm topsoil to 2 p. 100 in the 50-100 cm subsoil. About 2 m of this sand is overlying clay of the same type as in the loam field.

Cropping, crop rotation, crop protection : Experiments in each of the soils are divided into 4 fields giving the possibility of harvesting all crops in a 4-year course rotation every year. With a very few exceptions this has been the case throughout the years. The crop sequences are : Winter cereals — root crops — summer cereals with ley and one year ley. As in ordinary farming practice, the FYM has only been applied to some crops, while fertilizer has been distributed to all crops of the rotation.

The available means of crop protection were used against pests when necessary. Liming was carried out when pH tests indicated the need.

FERTILIZING

During each rotation the amounts of plant nutrients, nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) were on average the same whether supplied by FYM or NPK.

The supply of plant nutrients was changed in 1907, 1923, 1949 and 1972, dividing the experiment into four periods : 1894-1906, 1907-1922, 1923-1948 and 1949-1972. The average supply of N, P and K during the four periods is presented in table 1.

TABLE 1

Nutrients supplied. Averages for periods in kg/ha/year

	1 FYM			1 NPK		
	N	P	K	N	P	K
1894-1906	40	13	29	39	12	28
1907-1922	42	13	33	42	13	32
1923-1948	72	16	65	70	17	70
1949-1972	93 (1)	19	58	70	18	66

(1) FYM + mineral-N.

Apart from the last period only minor differences existed between the amounts of nutrients supplied in the FYM treatments and the NPK treatments. For the period 1949-1972 a supplement of nitrogen was given with the FYM treatments following the theory of FYM nitrogen being less available than mineral N. Based on other experiments on the effect of nutrients in FYM, an average supplement of 23 kg/ha of mineral N, together with 70 kg/ha of N given by FYM, was calculated to balance the 70 kg/ha of mineral N given in NPK. As the FYM spread to root crops had a rather small residual effect, it was resolved to give the supplement of mineral N in the FYM treatment to the cereals. As this, the last period, has been the most closely investigated, it might be interesting to show the distribution of nitrogen for the crops in the rotation.

TABLE 2

Nitrogen supplied during the period 1949-1972. Average N, kg/ha/year

	Treatments NPK			Treatments FYM		
	N	P	K	inorg. N	dung-N	urine-N
Winter cereals	70	16	66	60	0	0
Root crops	160	39	98	0	200	80
Summer cereals	50	16	34	31	0	0
Clover/grass or lupins	0	0	66	0	0	0

METHODS

The experiments are carried out with nearly square plots varying in size from 55 m² in the sand field to between 70 and 110 m² in loam field.

Although the plots are randomly distributed in the fields and showing no systematic design it would be convenient to divide the treatments into two groups ; 1) The farmyard manure experiments, and 2) The nutrient balance experiments.

TABLE 3

Treatments in the farmyard manure experiments

Treatment	Loam	Sand
Unmanured	1893	1893
1/2 FYM (3 fields only)	1894	—
1 FYM	1894	1894
1 1/2 FYM	1894	—
1/2 NPK	1923	1923
1 NPK	1894	1894
1 1/2 NPK	1923	—
FYM + 1/2 P	—	1894
FYM + 1/2 K	—	1894
FYM + 1/2 PK	—	1908

1. *In the farmyard manure experiment* different amounts of FYM were used and NPK was supplied as single fertilizers in amounts of nitrogen, phosphorus and potassium equal to that found on analysis of the FYM. Minor modifications have taken place in the treatments of some plots in the course of time. Table 3 gives the year for the start of present treatments.

2. *In the nutrient balance experiment* same amounts of NPK as in 1 NPK are given in the combinations shown in table 4.

TABLE 4

Treatments in the nutrient balance experiment

Treatments	Loam	Sand
NPK	1894	1894
PK	1934	1894
NK	1934	1949
NP	1894	1894
N	1894	1894
P	1894	1894
K	1894	1894
O (unmanured)	1893	1893

Single treatments comprised 4-20 plots per year in the loam field and 4-12 plots in the sand field.

RESULTS

Yields from single crops have been calculated as Scandinavian feed units (f.u.), and crop units (c.u.) equal to 100 f.u., making it possible to work out averages for the rotations. Results from the *farmyard manure experiment* are shown in table 5 and 6.

TABLE 5

Crop yields in the farmyard manure experiment. Averages for periods, c. u./ha/year. Askov loam

Askov loam	Unmanured	NPK			FYM	
		1/2	1	1 1/2	1	1 1/2
1894-1906	24.7	—	42.2	—	38.8	—
1907-1922	17.2	—	42.5	—	34.5	—
1923-1948	16.7	41.4	55.0	59.4	45.4	53.4
1949-1972	22.0	45.7	60.2	66.2	56.4	66.0

The figures show increases in yields following the increases in the amounts of nutrients (table 1) for different periods. Always NPK has been superior to FYM.

The *corresponding results from the sand field* are shown in table 6.

TABLE 6

Crop yields in the farmyard manure experiment. Averages for periods, c. u./ha/year. Askov sand

Askov sand	Unmanured	NPK		FYM	FYM +		
		1/2	1	1	1/2 P	1/2 K	1/2 PK
1894-1906	15.3	—	34.8	30.1	29.7	34.1	—
1907-1922	11.4	—	35.2	31.2	30.9	34.6	33.2
1923-1948	13.6	37.8	46.8	41.9	43.1	43.8	43.6
1949-1972	13.2	30.5	37.3	39.1	40.5	40.1	39.6

As in the loam field, here also the yields increased with increasing fertilization over the period 1894-1948. In contrast, in the period 1949-1972, a rather large decrease took place, particularly associated with the NPK treatments. There was also some smaller decrease for the other treatments, but during that period mineral N was given as a supplement to FYM. It is note-worthy that this supplement caused the FYM treatment to yield better than the NPK treatment.

A supplement of K to FYM in all periods resulted in yield increases above 1 FYM, but this occurred only in two of the periods when FYM had a supplement of P.

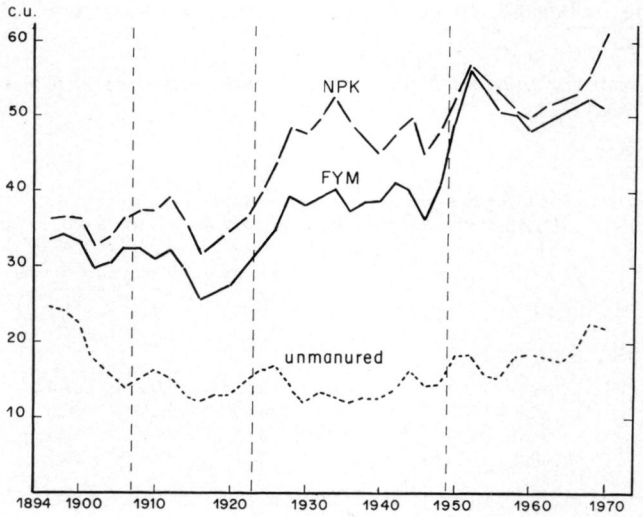


FIG. 1. — *Askov loam field 1894-1972*
Average of yields c.u./ha/year

Graphs 1 and 2 illustrate the average yield for the loam field and the sand field respectively during the period 1894-1972. The curves are based on averages for 4 successive years calculated by running means every two years.

The dotted vertical lines for the years 1907, 1923, 1949 and 1972 indicate the years of changes in nutrient supply. Resulting from the method of calculation the curves begin in 1896 and end in 1970.

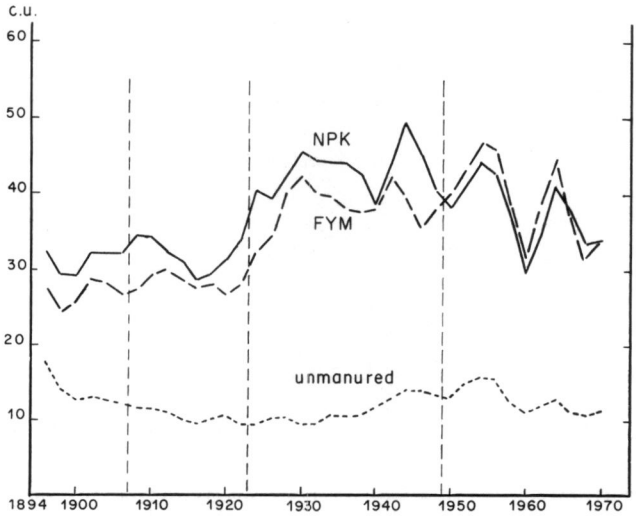


FIG. 2. — *Askov sand field 1894-1972*
Average of yields c.u./ha/year

The shape of the curves clearly shows the yield relations between FYM and NPK, and the favourable effect of mineral nitrogen added to FYM since 1949 is also very clear.

Results from the *nutrient balance experiments are shown in tables 7-10.*

TABLE 7

Crop yields in the nutrient balance experiment.
Averages for the periods, c. u./ha/year. Askov loam

Askov loam	NPK	PK	NK	NP	N	P	K	O
1894-1906	42.2	—	—	38.5	30.8	27.0	24.2	24.7
1907-1922	42.5	—	—	34.0	22.5	20.9	18.3	17.2
1923-1948	55.0	41.2 (1)	46.1 (1)	29.9	20.9	18.3	17.7	16.7
1949-1972	60.2	41.1	37.1	35.4	24.0	23.7	20.3	22.0

(1) 1935-48 only.

Where only a single nutrient was given, little more than « unmanured » yield was obtained. Where two out of three nutrients were given, the yield, though increased, was much less than the yield obtained with NPK.

The lack of one or two plant nutrients may result in marked yield reductions as illustrated in table 8, derived from table 7.

TABLE 8

Yield depressions following lack of one or two plant nutrients, compared to NPK, c. u./ha/year. Askov loam

Askov loam	NPK	PK	NK	NP	N	P	K	O
1894-1906	42.2	—	—	— 3.7	— 11.4	— 15.2	— 18.0	— 17.5
1907-1922	42.5	—	—	— 8.5	— 20.0	— 21.6	— 24.2	— 25.2
1923-1948	55.0	— 13.8	— 8.9	— 25.1	— 34.1	— 36.7	— 37.3	— 38.3
1949-1972	60.2	— 19.1	— 23.1	— 24.8	— 36.2	— 36.5	— 39.9	— 38.2

The figures show increasing depression of the yields with successive periods, following increasing depletion of the elements in question from the soil. The depression in 1949-1972 increased compared to 1923-1948 only for the treatments NK and PK, which were first established in 1935. The lack of increase for the older treatments might be due to a change in the root cropping from fodder sugar beet every rotation to fodder sugar beet alternating with swedes which are able to utilise poor soil better than beet.

Results from the *nutrient balance experiment* in the *sand field* are shown in table 9.

TABLE 9

Crop yields in the nutrient balance experiment. Averages for periods, c. u./ha/year. Askov sand

Askov sand	NPK	PK	NK	NP	N	P	K	O
1894-1906	34.8	24.5	—	22.9	24.0	16.3	22.2	15.3
1907-1922	35.2	22.8	—	19.7	20.8	11.7	20.7	11.4
1923-1948	46.8	28.9	—	20.8	19.1	12.1	23.5	13.6
1949-1972	37.3	20.7	37.0	21.7	19.7	12.9	15.8	13.2

The figures show no effect of a P supplement. Unmanured and P treatment both gave the same yield, so did N : NP, K : PK, NK : NPK. N and K alone each gave a modest effect compared to unmanured. For the treatment NK, which was first established in 1949, no effect of depletion of P was seen.

N and K supplements gave better effects. The sand field is known normally

to be rich in P and deficient in K. Nitrogen was always needed under the Askov climatic conditions.

Differences compared with the yield of the NPK treatment show an increase for the first three periods, table 10, as for the loam field.

TABLE 10

Yield depressions following lack of one or two plant nutrients, compared to NPK, c. u./ha/year. Askov sand

Askov sand	NPK	PK	NK	NP	N	P	K	O
1894-1906	34.8	— 10.3	—	— 11.9	— 10.8	— 18.5	— 12.6	— 19.5
1907-1922	35.2	— 12.4	—	— 15.5	— 14.4	— 23.5	— 14.5	— 23.8
1923-1948	46.8	— 17.9	—	— 26.0	— 27.7	— 34.7	— 23.3	— 33.2
1949-1972	37.3	— 16.6	— 0.3	— 15.6	— 17.6	— 24.4	— 21.5	— 24.1

For 1949-72 the yield average following NPK has decreased more than for the other treatments, just as was the case in the loam field. A possible explanation for this could be that in some years in the fifties failing precipitation resulted in very small crop yields especially in the sand field.

Plant nutrients removed by crops

During the years of the experiment an increasing amount of chemical investigations on soil and crops have been carried out following the increasing opportunities for such work and the increasing request for information on fertilization problems.

Crops from unmanured, FYM and NPK treatments were examined in 1904-1918 for N content.

Later more of the treatments were included, and for the periods 1931-1938

TABLE 11

Nutrients N, P and K removed from treatments in the FYM experiment. Average of periods kg/ha/year

		Askov loam			Askov sand		
		Unmanured	FYM	NPK	Unmanured	FYM	NPK
1904-1910	N	30.2	50.0	56.1	19.0	54.3	60.0
1911-1918	N	30.0	56.3	65.1	19.5	45.5	48.3
1931-1947	N	31.2	84.0	103.9	27.6	77.1	91.5
	P	4.5	13.6	15.2	5.7	15.5	16.3
	K	17.4	69.3	85.5	17.5	73.8	83.1

and 1944-1949 all crops from a total of 12 treatments in the loam field and 13 treatments in the sand field were analysed for N, P and K. Later still in the period 1949-1972, additional analyses for Na, Mg and Ca and for certain years protein fractions and some heavy metals were made. Table 11 shows removals of N during the periods 1904-1910 and 1911-1918, and of N, P and K during 1931-1947.

Apart from the period 1931-38 + 1944-47 for the sand field, the unmanured plots have delivered rather constant amounts of N from period to period. In the sand field lupins were grown from 1943 to 1948 and succeeded very well especially in the unmanured plots.

For the period 1949-1972 all crops were analysed for content of N, P and K. From these contents and the yields measured, the amount of N, P and K removed by the crops has been calculated for each treatment as averages for the period.

Results are given in table 12 for the farmyard manure experiment and in table 13 for the nutrient balance experiment.

TABLE 12

Nutrients N, P and K removed from treatments in the FYM experiment *1949-1972. Average kg/ha/year*

Askov loam	Unmanured	NPK			FYM	
		1/2	1	1 1/2	1	1 1/2
N	42	78	110	130	100	123
P	5	11	15	19	16	20
K	25	57	90	119	83	108

Askov sand	Unmanured	NPK		FYM	FYM +		
		1/2	1	1	1/2 P	1/2 K	1/2 PK
N	33	62	81	76	78	80	78
P	5	11	13	14	16	15	16
K	15	41	66	63	67	79	81

These figures show that Askov loam field on unmanured soil yearly supplied 42 kg N, 5 kg P and 25 kg K for the crops on average for the crop rotation. In the sand field the corresponding figures are 33 kg N, 5 kg P and 15 kg K. For both soil types as a rule increasing fertilization results in increasing removals of plant nutrients.

Apart from a very few exceptions it is evident that the more comprehensive the fertilization the larger the removal of plant nutrients.

Crops from the years 1953-1972 were further analysed for contents of Mg, Ca and Na ; the results for the FYM experiment are shown in table 14.

TABLE 13

Nutrients N, P and K removed from treatments in nutrient balance experiments. *Average 1949-1972, kg/ha/year*

		NPK	PK	NK	NP	N	P	K	O
Askov loam	N	110	79	77	68	48	38	42	42
	P	15	12	8	11	5	8	4	5
	K	90	79	67	29	22	23	43	25
Askov sand	N	81	50	80	55	49	32	41	33
	P	13	9	12	9	7	6	6	5
	K	66	48	64	19	17	15	36	15

TABLE 14

Removal in crops of Mg, Ca and Na. Average 1953-1972, kg/ha/year

Askov loam	Unmanured	NPK			FYM	
		1/2	1	1 1/2	1	1 1/2
Mg	4	6	8	8	10	12
Ca	17	32	44	48	38	44
Na	5	18	30	55	16	19

Askov sand	Unmanured	NPK		FYM	FYM +		
		1/2	1	1	1/2 P	1/2 K	1/2 PK
Mg	2	3	4	6	6	5	5
Ca	12	18	19	21	22	21	20
Na	3	5	5	5	6	6	4

Variations in removal of Mg and Na in crops from the loam field following the use of FYM and NPK respectively might be due to different supplies of these elements in the different fertilizers used.

The corresponding results from the nutrient balance experiment are seen in table 15.

TABLE 15

Removal in crops of Mg, Ca and Na. Average 1953-1972, kg/ha/year

		NPK	PK	NK	NP	N	P	K	O
Askov loam	Mg	8	6	5	5	4	4	3	4
	Ca	44	39	34	23	17	17	22	17
	Na	30	7	9	25	10	10	2	5
Askov sand	Mg	4	3	4	3	3	2	2	2
	Ca	19	13	21	17	14	10	11	12
	Na	7	3	5	7	7	3	2	3

Amino-acids in crops

In the light of the growing interest in the question of protein quality some of the crops from some of the treatments were examined for the content of amino-acids in the years 1964, 1968 and 1971.

Table 16 shows results for wheat as averages over three years.

TABLE 16

Content of amino-acids in wheat (15 p. 100 moisture).
Amino-acids, g/kg grain, average over 3 years. Askov loam

Askov loam	unmanured	FYM	NPK	PK	NK	NP	wheat (1)
Lysine	2.65	2.64	2.71	2.75	2.97	2.57	2.55
Histidine	1.90	1.87	1.92	1.89	2.18	1.81	2.38
Arginine	4.34	4.14	4.28	4.30	4.72	4.05	4.94
Asparagine acid	4.29	4.51	4.57	4.65	5.13	4.47	5.46
Threonine	2.64	2.55	2.65	2.59	2.89	2.54	3.06
Serine	3.78	3.71	4.12	3.74	4.43	3.70	4.94
Glutamic acid	22.47	22.45	22.98	22.02	28.19	21.96	38.09
Proline	7.49	7.03	7.31	7.27	9.08	7.29	
Glycine	3.49	3.43	3.52	3.48	3.88	2.89	4.43
Alanine	3.29	3.18	3.25	3.27	3.56	3.20	3.92
Cystine	1.76	1.73	1.61	1.62	1.90	1.58	1.87
Valine	3.95	3.70	3.78	3.73	4.29	3.73	4.77
Methionine	1.28	1.22	1.24	1.22	1.47	1.27	1.87
Iso-leucine	2.81	2.77	2.81	2.81	3.35	2.78	3.58
Leucine	5.59	5.47	5.60	5.52	6.54	5.49	7.17
Tyrosine	2.24	2.17	2.35	2.30	2.91	2.17	3.23
Phenylalanine	3.76	3.51	3.68	3.52	4.56	3.76	4.60
Total, amino-acids	77.73	76.08	78.38	76.68	92.05	75.26	96.86

(1) Average sample of Danish wheat (Eggum 1968).

TABLE 17

Amino-acids harvested in wheat grain, kg/ha/year. Askov loam

Askov loam	Unmanured	FYM	NPK	PK	NK	NP
Lysine	3.5	8.7	9.4	5.0	7.3	7.3
Histidine	2.5	6.1	6.7	3.4	5.3	5.1
Arginine	5.7	13.6	14.9	7.8	11.6	11.5
Asparagine acid	5.7	14.8	15.9	8.5	12.6	12.7
Threonine	3.5	8.4	9.2	4.7	7.1	7.2
Serine	5.0	12.2	14.3	6.8	10.9	10.5
Glutamic acid	29.7	73.6	79.7	40.1	69.1	62.1
Proline	9.9	23.1	25.4	13.2	22.2	20.6
Glycine	4.6	11.3	12.2	6.3	9.5	8.2
Alanine	4.3	10.4	11.3	6.0	8.7	9.1
Cystine	2.3	5.7	5.6	2.9	4.7	4.5
Valine	5.2	12.1	13.1	6.8	10.5	10.6
Methionine	1.7	4.0	4.3	2.2	3.6	3.6
Iso-leucine	3.7	9.1	9.8	5.1	8.2	7.9
Leucine	7.4	17.9	19.4	10.0	16.0	15.5
Tyrosine	3.0	7.1	8.2	4.2	7.1	6.1
Phenylalanine	5.0	11.5	12.8	6.4	11.2	10.6
Total amino acids (kg/ha)	102,7	249,6	272,2	139,4	225,6	213,1
Wheat grain (dt/ha)	13.2	32.8	34.7	18.2	24.5	28.3

TABLE 18

Content of amino-acids in barley (15 p. 100 moisture).
Amino-acids, g/kg grain, average over 3 years. Askov loam

Askov loam	unmanured	FYM	NPK	PK	NK	NP	barley (1)
Lysine	2.71	2.70	2.74	2.54	2.80	3.05	3.16
Histidine	1.44	1.50	1.50	1.35	1.56	1.75	1.78
Arginine	3.58	3.63	3.62	3.37	3.63	4.13	4.53
Asparagine acid	4.22	4.17	4.29	4.45	4.36	4.88	5.91
Threonine	2.37	2.40	2.50	2.48	2.66	2.86	2.60
Serine	2.74	2.69	2.96	2.62	2.96	3.40	3.57
Glutamic acid	13.44	13.84	15.10	13.07	14.85	17.48	21.47
Proline	5.92	5.99	6.40	5.61	6.57	7.78	
Glycine	2.97	2.89	3.08	2.95	3.03	3.34	3.71
Alanine	3.05	3.03	3.17	2.98	3.13	3.47	3.85
Cystine	1.35	1.50	1.44	1.34	1.49	1.62	1.92
Valine	3.39	3.46	3.66	3.40	3.74	4.17	4.53
Methionine	0.98	1.10	1.22	1.09	1.24	1.30	1.37
Iso leucine	2.29	2.37	2.47	2.26	2.48	2.85	3.16
Leucine	4.51	4.60	4.80	4.47	4.87	5.53	6.05
Tyrosine	1.90	2.02	1.93	1.89	2.04	2.43	3.16
Phenylalanine	3.01	3.03	3.37	2.90	3.38	3.94	4.13
Total amino-acids	59.87	60.92	64.25	58.77	64.79	73.98	74.90

(1) Average sample of Danish barley (Eggum 1968).

It appears from the table that the NK treatment deviates from the rest in having a higher content of amino-acids. *No significant differences can be seen between the rest of the treatments.*

Even though the content of amino-acids is of great importance for the feeding buality of grain, what really matters must be the total yield of amino-acids harvested. These yields are presented in table 17.

NPK gave the highest yield of both grain and amino-acids. The unmanured treatment gave the lowest yield of amino-acids as a consequence of its low grain yield. Although the NK treatment had the highest content of amino-acids it was unable to match NPK and FYM in yield.

Table 18 shows results for barley.

The highest concentration of amino-acids is presented by the NP treatment and the lowest by the PK treatment.

Figures for the yield of amino-acids are shown in table 19.

TABLE 19

Amino-acids harvested with barley grain, kg/ha/year

Askov loam	Unmanured	FYM	NPK	PK	NK	NP
Lysine	3.2	8.0	8.9	4.1	7.1	5.9
Histidine	1.7	4.4	4.8	2.2	3.9	3.4
Arginine	4.2	10.7	11.7	5.4	9.1	8.1
Asparagine acid	5.0	12.3	13.9	7.1	11.0	9.5
Threonine	2.8	7.1	8.1	4.0	6.7	5.6
Serine	3.2	8.0	9.6	4.2	7.5	6.6
Glutamic acid	15.9	41.0	48.8	20.9	37.4	34.1
Proline	7.0	17.7	20.7	9.0	16.6	15.2
Glycine	3.5	8.6	9.9	4.7	7.6	6.5
Alanine	3.6	9.0	10.2	4.8	7.9	6.8
Cystine	1.6	4.4	4.7	2.1	3.8	3.2
Valine	4.0	10.2	11.8	5.4	9.4	8.1
Methionine	1.2	3.3	3.9	1.7	3.1	2.5
Iso-leucine	2.7	7.0	8.0	3.6	6.2	5.6
Leucine	5.3	13.6	15.5	7.2	12.3	10.8
Tyrosine	2.2	6.0	6.2	3.0	5.1	4.7
Phenylalanine	3.6	9.0	10.9	4.6	8.5	7.7
Total amino acids	70.7	180.3	207.6	94.0	163.2	144.3
Grain dt/ha	11.8	29.6	32.3	16.0	25.2	19.5

The highest yield of amino-acids has been obtained with NPK, followed by FYM, NK and NP in decreasing order. PK and unmanured have yielded only one half and one third of the yield with NPK.

TABLE 20

Results of soil analyses, farmyard manure experiment, 1949-1972.
Askov loam

Askov loam		unmanured	NPK			FYM	
			1/2	1	1 1/2	1	1 1/2
pH(H_2O)	1949	6.8	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
	1953	6.3	6.2	6.3	6.3	6.2	6.2
	1957	6.6	6.5	6.5	6.6	6.5	6.5
	1961	6.7	6.7	6.7	6.9	6.6	6.6
	1965	7.0	7.0	7.0	7.1	6.9	6.8
	1969	6.6	6.5	6.6	6.6	6.5	6.5
	1972	6.8	6.7	6.8	6.8	6.7	6.6
	Average	6.7	6.6	6.7	6.7	6.6	6.6
Ft	1949	2.0	3.0	3.9	5.2	3.0	4.4
	1953	2.1	3.0	3.9	5.0	3.1	3.8
	1957	2.0	2.9	3.8	5.1	3.1	4.1
	1961	2.1	3.1	3.7	5.2	3.0	4.1
	1965	2.3	3.5	4.0	5.6	3.6	4.8
	1969	2.4	3.3	4.1	5.4	3.7	4.6
	1972	2.7	3.4	4.2	5.5	3.9	4.7
	Average	2.2	3.2	3.9	5.2	3.3	4.4
Kt	1949	4.1	4.8	6.1	9.1	6.6	8.3
	1953	2.9	3.5	4.8	7.0	5.0	6.3
	1957	2.5	2.9	4.1	5.8	3.9	4.9
	1961	2.8	4.1	4.8	6.7	3.7	4.7
	1965	2.8	3.3	4.7	7.2	3.7	4.4
	1969	3.6	3.6	4.5	6.5	4.3	4.7
	1972	3.7	3.8	5.2	7.0	4.7	5.4
	Average	3.2	3.7	4.9	7.0	4.6	5.5
Humus, percentage of dry soil	1949	2.15	2.44	2.48	2.51	2.67	2.89
	1953	2.18	2.37	2.49	2.51	2.67	2.86
	1957	2.20	2.36	2.49	2.56	2.63	2.84
	1961	2.10	2.37	2.41	2.49	2.58	2.82
	1965	2.18	2.30	2.44	2.41	2.60	2.86
	1969	2.15	2.27	2.37	2.37	2.58	2.72
	1972	2.17	2.30	2.36	2.41	2.55	2.71
	Average	2.16	2.34	2.44	2.48	2.61	2.82
N, percentage of dry soil	1949	.106	.120	.120	.124	.134	.146
	1953	.106	.117	.119	.121	.133	.143
	1957	.104	.116	.121	.123	.132	.144
	1961	.106	.118	.121	.124	.135	.145
	1965	.105	.112	.120	.119	.127	.138
	1969	.106	.114	.117	.121	.127	.137
	1972	.108	.117	.119	.123	.129	.140
	Average	.106	.116	.120	.122	.131	.142

TABLE 21

Results of soil analyses, farmyard manure experiment, 1949-1972.
Askov sand

Askov sand		unmanured	NPK		FYM	FYM +		
			1/2	1	1	1/2 P	1/2 K	1/2 PK
pH(H_2O)	1949	5.7	5.3	5.0	5.6	5.5	5.6	5.5
	1953	5.5	5.2	5.1	5.5	5.4	5.4	5.3
	1957	6.0	5.8	5.6	6.0	6.0	6.1	6.1
	1961	6.8	6.6	6.5	6.8	6.7	6.7	6.8
	1965	7.2	6.8	6.8	7.0	6.9	6.8	6.9
	1969	7.0	6.7	6.6	6.8	6.8	6.8	6.7
	1972	6.8	6.6	6.5	6.7	6.6	6.7	6.6
	Average	6.4	6.1	6.0	6.3	6.3	6.3	6.3
Ft	1949	4.5	5.5	5.9	5.6	6.7	5.6	6.8
	1953	4.9	5.8	6.2	6.0	6.8	5.9	6.9
	1957	5.0	5.8	6.7	6.0	7.3	6.3	7.4
	1961	5.4	6.1	7.1	6.9	7.9	6.9	8.0
	1965	5.5	6.3	7.4	7.0	8.2	6.9	8.1
	1969	5.5	6.6	7.6	7.1	9.0	7.3	9.0
	1972	5.1	6.5	7.3	6.5	8.1	7.2	8.4
	Average	5.1	6.1	6.9	6.4	7.7	6.6	7.8
Kt	1949	2.2	4.6	7.5	5.3	5.6	9.9	9.9
	1953	1.7	4.3	5.5	4.0	3.9	6.4	6.0
	1957	1.7	2.6	4.6	3.5	3.4	6.2	5.6
	1961	3.5	4.2	6.2	4.3	4.0	7.1	6.4
	1965	2.6	3.7	5.4	3.5	3.1	5.0	5.0
	1969	2.1	3.6	6.5	3.9	4.5	6.0	6.9
	1972	1.9	4.5	6.9	4.7	5.4	7.9	7.7
	Average	2.2	3.9	6.1	4.2	4.3	6.9	6.8
Humus, percentage of dry soil	1949	1.34	1.44	1.51	1.77	1.77	1.82	1.77
	1953	1.31	1.44	1.51	1.69	1.72	1.82	1.69
	1957	1.24	1.39	1.46	1.70	1.62	1.72	1.62
	1961	1.19	1.34	1.39	1.69	1.55	1.69	1.57
	1965	1.14	1.20	1.36	1.51	1.53	1.53	1.43
	1969	1.17	1.29	1.39	1.53	1.58	1.58	1.57
	1972	1.12	1.24	1.36	1.46	1.43	1.50	1.46
	Average	1.22	1.34	1.43	1.62	1.60	1.67	1.59
N, percentage of dry soil	1949	.064	.074	.076	.088	.089	.090	.086
	1953	.064	.070	.072	.081	.081	.082	.079
	1957	.062	.067	.066	.080	.081	.082	.077
	1961	.059	.061	.063	.077	.075	.080	.074
	1965	.054	.060	.065	.071	.071	.073	.067
	1969	.052	.062	.066	.072	.073	.075	.074
	1972	.053	.061	.066	.073	.071	.074	.071
	Average	.058	.065	.068	.077	.077	.079	.075

TABLE 22

Results of soil analyses, nutrient balance experiments, 1949-1972.
Askov loam

Askov loam		NPK	PK	NK	NP	N	P	K	O
pH(H_2O)	1949	6.7	6.6	6.7	6.9	6.8	6.9	6.8	6.8
	1953	6.3	6.1	6.2	6.5	6.4	6.4	6.2	6.3
	1957	6.5	6.5	6.5	6.7	6.6	6.7	6.5	6.6
	1961	6.7	6.5	6.6	7.0	6.9	6.8	6.6	6.7
	1965	7.0	6.8	6.9	7.2	7.0	7.0	7.0	7.0
	1969	6.6	6.5	6.5	6.7	6.7	6.6	6.4	6.6
	1972	6.8	6.5	6.6	6.8	7.0	6.8	6.6	6.8
	Average	6.7	6.5	6.6	6.8	6.8	6.7	6.6	6.7
Ft	1949	3.9	3.9	2.1	4.7	1.7	5.5	1.4	2.0
	1953	3.9	3.8	2.2	4.7	1.7	5.3	1.5	2.1
	1957	3.8	3.8	2.1	4.5	1.8	5.3	1.5	2.0
	1961	3.7	3.7	2.1	4.8	1.8	5.5	1.5	2.1
	1965	4.0	4.3	2.2	5.1	2.3	5.0	2.0	2.3
	1969	4.1	4.2	2.1	4.8	2.1	5.2	1.9	2.4
	1972	4.2	4.3	2.4	4.6	2.4	5.1	2.1	2.7
	Average	3.9	4.0	2.2	4.7	2.0	5.3	1.7	2.2
Kt	1949	6.1	8.0	8.0	3.9	3.7	3.1	14.4	4.1
	1953	4.8	6.1	7.7	2.4	3.0	2.4	13.3	2.9
	1957	4.1	4.9	6.1	1.9	2.2	1.8	11.7	2.5
	1961	4.8	6.1	7.9	2.2	2.5	2.0	14.3	2.8
	1965	4.7	5.9	8.9	2.1	2.8	1.9	11.7	2.8
	1969	4.5	6.8	9.0	2.4	3.5	2.5	13.1	3.6
	1972	5.9	6.7	9.2	2.7	3.0	2.7	11.3	3.7
	Average	4.9	6.4	8.1	2.5	3.0	2.3	12.8	3.2
Humus, percentage of dry soil	1949	2.48	2.44	2.78	2.15	2.45	2.18	2.20	2.15
	1953	2.49	2.37	2.75	2.11	2.35	2.18	2.23	2.18
	1957	2.49	2.40	2.63	2.20	2.39	2.18	2.20	2.20
	1961	2.41	2.37	2.66	2.16	2.32	2.13	2.20	2.09
	1965	2.44	2.30	2.64	2.18	2.30	2.13	2.15	2.18
	1969	2.37	2.27	2.66	2.21	2.35	2.11	2.16	2.15
	1972	2.36	2.28	2.54	2.21	2.23	2.11	2.18	2.16
	Average	2.44	2.34	2.66	2.17	2.34	2.14	2.18	2.15
N, percentage of dry soil	1949	.120	.122	.128	.106	.109	.097	.107	.106
	1953	.119	.121	.126	.112	.111	.100	.106	.106
	1957	.121	.120	.128	.103	.108	.097	.102	.104
	1961	.121	.121	.127	.111	.108	.098	.106	.106
	1965	.120	.118	.121	.102	.106	.102	.101	.105
	1969	.117	.115	.125	.107	.110	.104	.104	.106
	1972	.119	.121	.125	.112	.110	.102	.106	.108
	Average	.120	.120	.126	.108	.109	.100	.105	.106

TABLE 23

Results of soil analyses, nutrient balance experiments, 1949-1972.
Askov sand

Askov sand		NPK	PK	NK	NP	N	P	K	O
pH(H_2O)	1949	5.0	5.4	5.3	5.2	5.2	5.7	5.7	5.7
	1953	5.1	5.2	5.2	5.1	5.2	5.6	5.4	5.5
	1957	5.6	5.8	5.8	5.6	5.7	6.2	6.0	6.0
	1961	6.5	6.7	6.6	6.5	6.5	6.9	6.8	6.8
	1965	6.8	6.8	6.7	6.6	6.8	7.1	7.0	7.2
	1969	6.6	6.7	6.7	6.6	6.6	7.0	7.0	7.0
	1972	6.5	6.7	6.6	6.6	6.7	6.9	6.9	6.8
	Average	6.0	6.2	6.1	6.0	6.1	6.5	6.4	6.4
Ft	1949	5.9	6.8	5.4	6.8	4.6	7.0	4.1	4.5
	1953	6.2	7.2	5.6	7.1	5.1	7.1	4.4	4.9
	1957	6.7	7.6	5.2	7.4	5.0	7.3	4.2	5.0
	1961	7.1	8.0	5.7	7.7	5.5	7.6	4.6	5.4
	1965	7.4	8.2	5.7	7.9	5.7	7.7	4.9	5.5
	1969	7.6	8.7	6.2	8.1	5.9	7.6	5.0	5.5
	1972	7.3	8.5	6.2	7.6	6.0	7.4	5.1	5.1
	Average	6.9	7.9	5.7	7.5	5.4	7.4	4.6	5.1
Kt	1949	7.5	9.2	7.1	2.6	2.3	2.5	9.7	2.2
	1953	5.5	6.9	4.3	2.0	1.7	2.0	7.7	1.7
	1957	4.6	6.3	4.9	1.4	1.2	1.5	7.5	1.7
	1961	6.2	8.0	6.7	2.1	1.8	1.9	7.7	3.5
	1965	5.4	6.2	4.8	2.0	2.2	2.4	7.2	2.6
	1969	6.5	6.9	5.4	2.3	1.7	2.4	6.9	2.1
	1972	6.9	7.9	6.4	2.0	1.6	1.9	7.5	1.9
	Average	6.1	7.3	5.7	2.1	1.8	2.1	7.7	2.2
Humus, percentage of dry soil	1949	1.51	1.46	1.87	1.47	1.46	1.32	1.37	1.34
	1953	1.51	1.47	1.63	1.42	1.34	1.27	1.30	1.30
	1957	1.46	1.30	1.63	1.34	1.34	1.18	1.20	1.23
	1961	1.39	1.32	1.53	1.32	1.23	1.15	1.18	1.18
	1965	1.35	1.23	1.44	1.23	1.23	1.13	1.15	1.13
	1969	1.39	1.34	1.53	1.34	1.23	1.20	1.22	1.16
	1972	1.35	1.27	1.49	1.25	1.18	1.18	1.20	1.11
	Average	1.42	1.34	1.58	1.33	1.28	1.20	1.23	1.20
N, percentage of dry soil	1949	.076	.066	.094	.071	.067	.066	.064	.064
	1953	.072	.069	.077	.067	.066	.059	.061	.064
	1957	.066	.063	.077	.063	.063	.055	.059	.062
	1961	.063	.061	.074	.060	.061	.054	.055	.059
	1965	.065	.060	.073	.060	.059	.057	.054	.054
	1969	.066	.060	.073	.062	.058	.057	.056	.052
	1972	.066	.062	.073	.061	.059	.057	.058	.053
	Average	.068	.063	.077	.063	.062	.058	.058	.058

Soil analyses

The effect of the different treatments on the soil has been followed intermittently during the earlier years of the experiment. Sampling was confined to single fields or to a few treatments in all fields. The earliest soil samples which included all fields were those taken in 1923, when the treatments unmanured, FYM and NPK were examined. During the period 1949-1972 sampling was carried out every fourth year. The samples were examined for pH, Ft, Kt, humus and total nitrogen.

Values of pH have been measured in water extracts.

Ft content of available phosphorus in soil samples is calculated after extracting the soil with 0.2 *n* sulfuric acid. One Ft-unit equals 3 mg P/100 g soil or 75 kg P ha 0-20 cm topsoil.

Kt, available potassium, is calculated after extracting the soil with 0.5 molar ammonium acetate. One Kt-unit equals 1 mg K/100 g soil or 25 kg K per ha, 0-20 cm topsoil.

Total nitrogen was measured by the method of Kjeldahl and humus measured as carbon multiplied by 1.72, following Ter Meulen.

Results for the period 1949-1972 are presented in *table 20 and 21 for the FYM experiment* and in *tables 22 and 23 for the nutrient balance experiment.*

No influence on pH from the fertilization has been observed, but liming during the winter 1957-58 and again in 1964-65 increased the pH values, whilst a supplementary liming in the autumn of 1969 stabilized the pH level. The amounts of lime are shown in table 24.

TABLE 24

Lime supply in tonnes/ha. Average of 4 fields

	1957-58	1964-65	1969
Loam field	1.7	5.0	2.0
Sand field	4.5	3.8	3.6

The lime applications were calculated on the basis of lime requirement analyses in the different fields.

Generally the *Ft values* are higher in the sand field than the corresponding figures for the loam field. The reason for this might be that the sand field was cultivated centuries before the loam field, which was cleared from woodland about two hundred years ago.

The figures increased slightly during the period corresponding with the increase in the pH values. A suggestion which could not at present be proved, might be that some phosphate from beneath the plough layer has been mixed with the topsoil following the increase in the ploughing depth with years.

According to P supply rather large variations have taken place. The highest Ft figures were seen in the sand field following the treatments PK, FYM + 1/2 PK

and FYM + 1/2 P. The lowest figure was in the sand field with the K treatment, where depletion was greater than in the unmanured treatment.

In the loam field the highest figure was seen for the P treatment, closely followed by 1 1/2 NPK and the lowest figure here too was seen for the K treatment.

Similarly the *Kt figures* increased with increasing K fertilization but not, like the Ft figures, with time. Large differences were seen between the figures from treatments which were, or were not, fertilized with potassium. The largest figure was seen for the K treatment in the loam field and the lowest for the N treatment in the sand field.

The design for the nutrient balance experiments opens the possibility of evaluating the effect of the three nutrients N, P and K supplied as single nutrients, in combinations of two, or all three given together. The 8 plots can always be divided into 2 groups of 4 treatments of which one group had a certain nutrient supplied and the other had not. Differences between the two groups illustrate the effect of the nutrient in question when given alone or together with one or both of the others.

The model exemplified by phosphate is as follows :

Treatments { with P	P	PN	PK	PKN
Treatments { without P .	O	N	K	KN
Difference, P effect	P_O	P_N	P_K	P_{KN}

When using this model it is possible to evaluate the effect of a nutrient supplied on different parameters measured in the experiment. In tables 25 and 26 the effect of P and K is compared to the average removal with crops 1949-72 and average soil indices, Ft and Kt respectively.

TABLE 25

Effect of P fertilizing, 18 kg/ha/year, on P removals, P, kg/ha/year and Ft, 1949-72

	Loam field				Sand field			
	P_O	P_N	P_K	P_{KN}	P_O	P_N	P_K	P_{KN}
Removals { with P ..	8	11	12	15	6	9	9	13
Removals { without P	5	5	4	8	5	7	6	12
Difference P effect ...	3	6	8	7	1	2	3	1
Ft with P	5.3	4.7	4.0	3.9	7.4	7.5	7.9	6.9
Ft without P	2.2	2.0	1.7	2.2	5.1	5.4	4.6	5.7
Difference P effect ...	3.1	2.7	2.3	1.7	2.3	2.1	3.3	1.2

For potassium similar calculations were made from the following model :

Treatments { with K	K	KN	KP	KPN
Treatments { without K .	O	N	P	PN
Difference, K effect	K_O	K_N	K_P	K_{PN}

TABLE 26

Effect of K fertilizing, 66 kg/ha/year, on K removal and Kt, 1949-72

	Loam field				Sand field			
	K_O	K_N	K_P	K_{PN}	K_O	K_N	K_P	K_{PN}
Removals { with K ..	43	67	79	90	36	64	48	66
Removals { without K	25	22	23	29	15	17	15	19
Difference, K effect ..	18	45	56	61	21	47	33	47
Kt with K	12.8	8.1	6.4	4.9	7.7	5.7	7.3	6.1
Kt without K	3.2	3.0	2.3	2.5	2.2	1.8	2.1	2.1
Difference, K effect ..	9.6	5.1	4.1	2.4	5.5	3.9	5.2	4.0

TABLE 27

Supply and removal of P and K 1894-1972 in relation to soil indices
Askov nutrient balance experiment

	Estimated figures (kg/ha)			
	phosphate		potassium	
	loam	sand	loam	sand
Total supply in 79 years .	1 264	1 264	4 266	4 266
Total removal in 79 years, NPK plots	1 185	1 027	7 110	5 214
Difference left in soil	79	237	— 2 844	— 948
Total removal in 79 years, P and K plots	632	474	3 397	2 844
Difference left in soil	632	790	869	1 422
Left in badly fed plots compared to well fed, difference	553	553	3 713	2 370
Equivalent to Ft and Kt	7.4	7.4	149	95
Soil indices observed average 1949-1972				
P and K plots	5.3	7.4	12.8	7.7
NPK plots	3.9	6.9	4.9	6.1
Difference	1.4	0.5	7.9	1.6

Comparing the figures for supply and removal, and soil indices for P and K, shows that when supplying fertilizer containing N, P and K, both removal and soil indices increased with increasing fertilization. On the other hand, when supplying a constant amount of one of the nutrients alone or together with one or two of the other nutrients, removal increased with number of nutrients in the combination, whereas soil indices decreased.

A calculation based on the results from P, K and NPK treatments, which had supplied respectively 16 kg P, 54 kg K and 16 kg P + 54 kg K/ha/year on average from 1894 to 1972, and taking crop analysis performed during 24 years as a reliable estimate for the removal by crops, gave the figures in table 27.

Considering phosphorus, the well fed crops, *i. e.*, those given NPK, removed approximately the amount supplied, but in contrast some extra potassium was supplied from both soils. After unbalanced fertilizing, however, crop removal was considerably less than the supply. Differences between quantities of nutrients supplied by fertilization and removed by the crops may be regarded as nutrients left in the soil.

As can be seen from table 27 more P and K was left in the soil after unbalanced than after balanced treatments. This difference could be expressed in terms of soil indices and compared to differences in the values observed. The variations found in this way may indicate that a part of the nutrient supplied must have been lost from the topsoil in some way or another. Among possible explanations for losses are :

1. Removal of P and K in crops may be larger than estimate.
2. Leaching of P and K from soil.
3. Carrying over of soil and nutrients from one treatment to another.
4. Fixation of P and K in topsoil in compounds not accessible to Ft and Kt analysis.

Future investigations may shed light on these questions.

Humus balance

A long-standing question has been whether fields are able to maintain their productivity when fertilized with commercial fertilizer only.

As was illustrated in graphs 1 and 2, crop yields are higher after NPK than after FYM, but the difference is greater for the loam field than for the sand field. Generally one can say with confidence that productivity for these soils under Askov climatic conditions and with the rotations used has been well maintained by exclusive use of commercial fertilizers when supplied in quantities replacing the nutrients taken away by crops.

Generally levels of C content and N content (tables 20-23) are lower in the sand field than in the loam field. The figures show a slight decrease during the period especially for the sand field.

The changes with the years are illustrated in graph 3 for the treatments unmanured, FYM and NPK in both fields. For comparison the figures back to 1923, when the first samples were taken, have been included.

The curves indicate that the relative humus contents associated with the treatments have not changed since 1923. Therefore the decline in the humus levels during

the years is probably not a result of increased mineralization of humus. It is more likely to be dilution following for example the ploughing up of increasing amounts of subsoil into the topsoil from which the soil samples were taken. Apart from an increase in the amounts of fertilizer given only minor changes have taken place during the years.

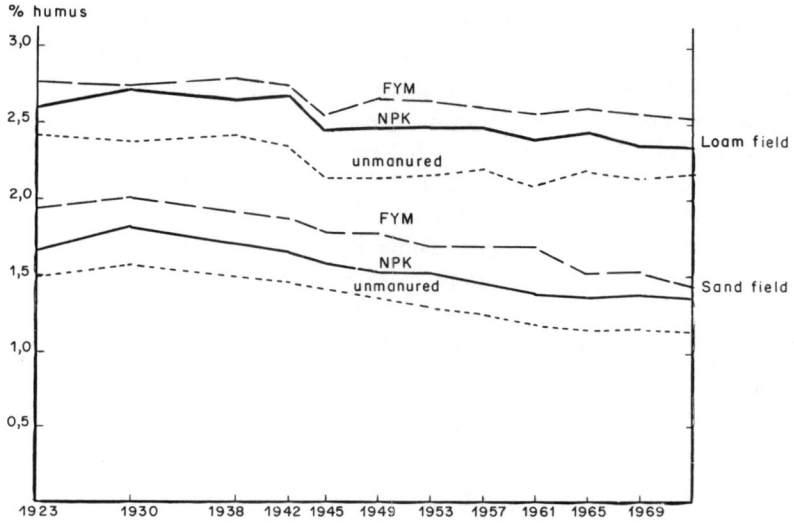


FIG. 3. — *The humus content in soil, 0-20 cm* (p. 100 C × 1,72)
Askov loam field and sand field 1923-1972

The figures for percentage humus and percentage N in the tables 20-23 show some difference between the treatments mostly associated with the N and K supply. The humus content was not maintained by N alone or by NP, whilst PK was as good as NPK. This could be at least partly explained by the clover/grass crop growing very well on PK. Increasing NPK as well as FYM also gave increasing content of

TABLE 28

Content of humus and soil nitrogen, percentage and kg/ha in treatments from the FYM experiment.
Average 1949-1972

					Difference compared with unmanured	
Askov loam	humus (%)	N (%)	humus (kg)	N (kg)	humus (kg)	N (kg)
Unmanured.....	2.16	.106	54 000	2 650	—	—
1/2 NPK	2.34	.116	58 500	2 900	4 500	250
1 NPK	2.44	.120	61 000	3 000	7 000	350
1 1/2 NPK	2.48	.122	62 000	3 050	8 000	400
1 FYM	2.61	.131	65 250	3 275	11 250	625
1 1/2 FYM	2.82	.142	70 500	3 550	16500	900

humus and nitrogen in the soil. Taking the weight of soil in the topsoil from 0-20 cm of the loam field to be 2 500 t/ha gives the following amounts for different treatments (see table 28).

Presuming the differences from the unmanured treatment to result from the fertilization, the NPK treatments accumulate 4 500 to 8 000 kg humus and 250-400 kg N, whilst the accumulations after FYM application are 11 250 to 16 500 kg humus and 625-900 kg N.

Differences between FYM treatments and NPK treatments having the same crop yield may represent the accumulation from organic material in FYM.

The nitrogen supply with FYM in 79 years comprises 4 580 kg N in 1 FYM and 6 870 kg N in 1 1/2 FYM. Accumulations of soil N calculated as the differences 1 FYM minus 1/2 NPK and 1 1/2 FYM minus 1 NPK are 375 and 550 kg N respectively. These represent 8 p. 100 of the nitrogen supplied with FYM.

If conditions are not constant the humus level may change. During 16 years we followed the humus content on Askov loam field in plots which had the same fertilization as 1 NPK but under different crop rotations. Results are illustrated in graph 4.

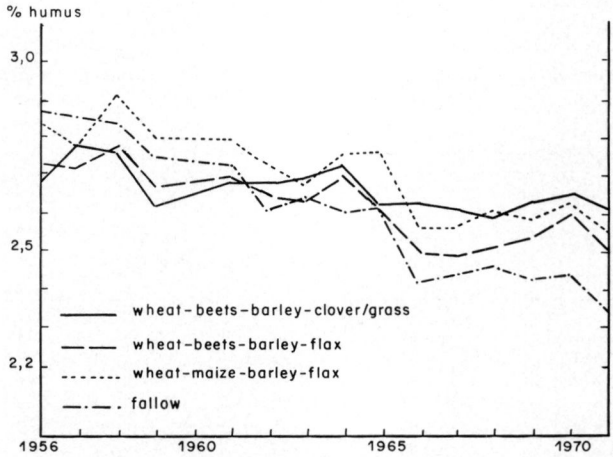


FIG. 4. — *Effect of different crop rotations on the humus content of soil*
Askov loam field

In spite of different starting points it is easy to see the humuspreserving effect of clover/grass, the other crop rotations causing a decline in humus level.

Elsewhere there are reports of structural problems occurring when plant roots alone supply organic matter to the soil.

One can infer that in the long run, rotations containing a high percentage of small grain crops, especially summer barley, with low returns of organic matter to the soil, may cause more soils to show difficulties in cultivation and in maintaining high productivity.

Organic matter supply must assist mineral nutrients to secure maximum utilization of the soil.

Other investigations

In the past the long-term experiments in Askov have inspired valuable experiments concerning fertilization and, arising from this, supplied soil and plant material for investigations in other places. Especially noteworthy are the demonstrations of hunger signs in crops, which have been drawn from its fields. Potassium deficiencies in clover, barley and fodder sugar beet are very evident for the NP treatment, and because of the history of the treatment, the deficiency symptoms of the plants here can be used as a standard for potassium deficiencies.

Recently investigations on soil samples have illustrated theories of availability of P and K from exhausted soils (LAMM ; NAFADY, 1971 ; NIELSEN, DISSING, 1970, 1971) and others, and most recently soil samples were used for study on *microbiologial counts* in 7 plots in one of the fields (EILAND, 1975). In this, CO_2 production measured in the laboratory at 25°C was chosen as a measure of total microbiological activity. Samples were taken in single plots on three dates and incubated as soon as possible. Results are shown in table 29.

TABLE 29

CO_2-production in soil samples taken from different treatments in field B_2 Askov loam, CO_2, mg/100 g soil

	Incubation period			Average
	1974 9-7/30-7	1974 26-9/17-10	1975 25-1/9-2	
Unmanured	66	68	55	63
1/2 NPK	69	93	103	88
1 NPK	92	84	89	88
2 NPK	81	90	81	84
1/2 FYM	85	101	79	88
1 FYM	89	103	91	94
2 FYM	110	121	118	116

No differences were seen between samples taken in the same plot at different periods of the year. Generally plots with farmyard manure produced more CO_2 than unmanured and NPK plots.

Digestion tests were made for the harvest 1973 at the Biotechnical Institute in Kolding. Samples of barley grain were tested on rats. Figures for true digestibility, TD, biological value, BV, and nett protein utilization, NPU, are shown in table 30.

There was no indication of an influence of the fertilizer as such on the NPU, except for a negative correlation of the nitrogen content of the barley on the NPU ($r = -0.53$), and even that was not very convincing.

TABLE 30

Results from digestibility experiments with barley on rats, p. 100 of protein

Askov loam	Unmanured	NPK			FYM	
		1/2	1	1 1/2	1	1 1/2
TD	86	85	86	89	85	86
BV	77	81	79	78	79	83
NPU	66	69	68	69	67	71

	NPK	PK	NK	NP	N	P	K	O
TD	86	87	90	87	90	89	84	86
BV	79	78	73	80	74	77	83	77
NPU	68	68	65	70	66	68	69	66

EPILOGUE

The long term experiments in Askov now in their fourth quart century have during the years passed given very valuable information to agriculture in Denmark, and furthermore given inspiration to lots of other investigations. It is to believe that the same may be the case also in the future.

A new period deals with the problem of utilization of organic manures in crop rotations with increased area of cereals. The problem of huge amounts of organic manure to restricted areas is growing more and more important and we hope to be able to contribute to its solution.

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

ASKOV 1894 : ENGRAIS MINÉRAUX ET FUMIER SUR SOL SABLEUX ET SUR SOL DE LIMON

Des essais poursuivis à Askov de 1894 à 1972 sur un sol sablo-limoneux et sur un autre sol légèrement sableux, portaient sur la comparaison des effets du fumier de ferme et des engrais artificiels. Ces essais ont montré une meilleure efficacité des engrais minéraux artificiels sur les rendements quand les éléments nutritifs étaient apportés en égale quantité par les deux types d'engrais.

Les parcelles appauvries indiquèrent la nécessité de l'application des trois éléments N, P et K pour l'obtention de rendements maximum. Le rendement était toujours limité par l'absence d'apport d'azote et, en présence d'azote, le phosphore était le facteur limitant en sol limoneux, le potassium, en sol sableux.

Les analyses de sols en provenance des parcelles appauvries indiquèrent un accroissement des indices pour P et K, tandis que les rendements diminuaient.

La teneur en humus du sol diminua nettement au cours des années, particulièrement en sol sableux. L'explication pourrait en être la dilution de l'humus avec le sol, consécutive à l'intensification agricole, en ce qui concerne plus spécialement la profondeur de travail du sol.

ZUSAMMENFASSUNG

MINERALISCHE DÜNGER UND MIST AUF SANDBODEN UND LEHMBODEN : ASKOV 1894

Die in Askov von 1894 zu 1972 auf sandiger Lehm und einen anderen Loser Sand durchgeführten Versuche betrafen den Vergleich der Wirkungen des Stallmistes und der Kunstdünger. Diese Versuche erwiesen eine bessere Wirksamkeit der mineralischen Kunstdünger auf die Erträge wenn die Nährstoffe in gleichen Mengen von beiden Düngertypen zugeführt waren.

Die verarmten Parzellen deuteten auf die Notwendigkeit, die drei Elemente N, P und K zu verabreichen, um Maximalerträge zu erreichen. Der Ertrag war immer durch die Abwesenheit von Stickstoffzufuhr eingeschränkt und in Anwesenheit von Stickstoff war der Phosphor der Grenzfaktor in Lehmboden und das Kalium in Sandboden.

Die Analysen der aus den verarmten en Parzellen stammenden Böden zeigten eine Steigerung der Kennziffer für P und K während die Erträge abnahmen.

Der Gehalt des Bodens an Humus nahm stark im Laufe der Jahre ab, insbesondere auf Sandboden. Es konnte die Folge der Verdünnung von Humus mit dem Boden nach einer Intensivierung der landwitschaftlichen Bewirtschaftung, was insbesondere die Tiefe der Bodenbearbeitung betrifft, sein.

РЕЗЮМЕ

Асков 1894 : минеральные удобрения и навоз на песчанных и суглинистых почвах.

А. ДЭМ, КО. ФО. ЭД.

Опыты, проводившиеся в Аскове с 1894-го до 1972-го года на песчанно-суглинистой и легкой песчанной почвах, служили для сравнения действия навоза и искуственных удобрений. Они показали, что лействие минеральных удобрений на урожайность было более эффективным в случаях когда оба эти вида удобрений приносили в почву одинажовое количество питательных элементов.

Для получения максимальных урожаев, обедненные делянки нуждались во внесении всех трех главных элементов питания N, P и K. Урожайность была ограниченной в отсутствии азота, в присутствии которого ограничивающим фактором являлись фосфор — в суглинистой почве, и калий — в почве песчанной.

Анализы почв из обедненных делянок указывали на увеличение показателей для P и K, при уменьшении урожайности.

С годами, содержание гумуса в почве уменьшалось, особенно в почве песчанной. Об' яснить это можно его разбавлением в почве, вследствии интенсификации сельскохозяйственных обработок, и особенно, увеличения глубины этих последних.

ACKNOWLEDGEMENT

We wish to express our sincere gratitude to Dr. E. R. Page, Wellesbourne (England) for his excellent help in preparing the english manuscript.

REFERENCES

ANONYM, 1908. Resultater af 13 års forsøg over anvendelsen af staldgødning og kunstgødning på forsøgsmarkerne ved Askov 1894-1906. 26. medd. fra Statens Planteavlsudvalg. *Tidsskrift f. Planteavl*, **16**, p. 166. *Da.*

ANONYM, 1908. Resultater af 9 års forsøg med staldgødning anvendt i forskellige mængder og til forskellig tid på forsøgsmarkerne ved Askov 1898-1906. 27. medd. fra Statens forsøgsvirksomhed i Plantekultur. *Tidsskrift f. Planteavl*, **16**, p. 540-542. *Da.*

A. T. V., GØDNINGSUDVALGET, 1951. Undersøgelse af gødskningens indflydelse på afgrødernes kemiske sammensætning. *Akademiet for de tekniske videnskaber*, beretning nr. **16**, 79 pages. *Da.*

CHRISTENSEN H. R., 1927. Jordbundsundersøgelser i forbindelse med fastliggende gødningsforsøg på mineraljorder. *Tidsskrift f. Planteavl*, **33**, p. 197-411. *Da.*

DORPH-PETERSEN K., 1954. Jorden som fosforkilde for planterne. (The soil as a source of phosphorus for plants). *Tidsskrift f. Planteavl*, **57**, p. 553-677. *Da, e.*

EGGUM Bj., 1968. Aminosyrekoncentration og proteinkvalitet. *Stougaards Forlag, København*, 1968. *Da.*

EILAND F., 1975. Undersøgelser over gødningers mulige indvirkning på mikrobielle forhold i jorden og disse forholds eventuelle sammenhæng med høstudbyttet. *Hovedopgave under afd. for mikrobiologi og mikrobiel økologi.* K.V.L., p. 134. *Da.*

HANSEN F., HANSEN J., 1913. Gødningsforsøg på forsøgsstatitionen ved Askov 1894-1910. *Tidsskrift f. Planteavl.*, **20**, p. 345-539. *Da.*

HANSEN F., 1938. Temperaturen i staldgødet og kunstgødet jord. *Tidsskrift f. Planteavl*, **43**, p. 358-360. *Da.*

IVERSEN K., 1927. Gødningsforsøg på forsøgsstationerne ved Askov og Lyngby. *Tidsskrift f. Planteavl*, **33**, p. 557-752. *Da.*

IVERSEN K., 1927. Nyere undersøgelser vedrørende staldgødningens anvendelse. (Foredrag) NJF *Tidsskrift*, 1927, p. 313-329. *Da.*

IVERSEN K., 1928. Stalldüngerversuche der dänishen Versuchsstation Askov und Lyngby. *Z. Pflanzenernährung, Düngung u. Bodenkunde*, B, VII, p. 457-471. *De.*

IVERSEN K., 1932. Forsøg med ensidig kunstgødning, Askov 1894-1930. (Experiments with commercial fertilizers). *Tidsskrift f. Planteavl*, **38**, p. 537-612. *Da, e.*

IVERSEN K., 1933. Forsøg med kunstgødning på staldgødet jord 1894-1930. (Experiments with one-nutrient fertilizers as addition to farmyard manure). *Tidsskrift f. Planteavl*, **39**, p. 1-113. *Da, e.*

IVERSEN K., 1933. Dänische Versuche zur Herbst- und Frühjahrsdüngung mit Stalldünger. *Archiv für Pflanzenbau*, **10**, p. 203-236. *De.*

IVERSEN K., DORPH-PETERSEN K., 1951. Forsøg med staldgødning og kunstgødning ved Askov 1894-1948. (Field experiments with farmyard manure and artificial fertilizers at Askov 1894-1948). *Tidsskrift f. Planteavl*, **54**, p. 363-538. *Da, e.*

IVERSEN K., 1953. Dänische Versuche mit Stalldünger und Handelsdünger. *Die Phosphorsäure*, **13**, p. 200-219. *De.*

IVERSEN K., 1954. Vergleichende Versuche mit Stalldünger und Handelsdünger. *OEEC-FAO-rapport from a symposium in Magleås*, Denmark 1954, p. 201-211. Editions in german, english and french.

IVERSEN K., 1956. Versuche mit Stalldünger und Mineraldünger. (Vortragsreferat). *Kurz und Bündig*, **9**, p. 228-230. *De.*

IVERSEN K., 1959. Dänische Versuche mit Stalldünger und Kunstdünger. Bodenanalysen u. Feldversuche. *Z. Acker-u. Pflanzenbau*, **110**, p. 1-32. *De.*

JØRGENSEN C. A., 1940. Om kalihungersymptomer på landbrugsplanterne og deres anvendelse ved påvisning af kalitrang i marken. *Tidsskrift f. Planteavl*, **44**, p. 557-633. *Da.*

KOFOED A., DAM, 1959. Mekanisk jordbearbejdnings indflydelse på superfosfats bevægelse i jorden belyst ved hjælp af radioaktivt fosfor. *Tidsskrift f. Planteavl*, **63**, p. 285-306. *Da, e.*

KOFOED A., DAM, 1971. De langvarige gødningsforsøg ved Askov. b. Humusbalancen. *Bilag Statens planteavlsmøde*, 1971, s. 20-25. *Da.*

KOFOED A., DAM, NEMMING O., De langvarige gødningsforsøg ved Askov 1894-1972. *Tidsskrift f. Planteavl* (in preparation).

LINDHARD J., 1971. De langvarige gødningsforsog ved Askov. a. Næringsstofbalance og gødningsvirkning. *Bilag Statens planteavlsmøde*, 1971, s. 9-19. *Da.*

LINDHARD J., 1973. Om kvælstoffets kredsløb. *Ugeskrift for Agronomer og Hortonomer*, 2/7, s. 126-131. *Da.*

NAFADY M. H., 1971. Studies on potassium properties in the old fertilized and unfertilized field plots at Askov experimental Station. *Acta agriculturae Scandinavica.* Vol. XXII, p. 121-127, 1972. *E.*

NIELSEN J., DISSING, 1970. Fiksering og frigørelse af kalium. (Fixation and release of potassium in Danish soils). *Tidsskrift. f Planteavl*, **74**, p. 24-43. *Da, e.*

NIELSEN J., DISSING, 1971. Kvantitets-intensitets relationer for kalium. (Quantity-Intensity relations of potassium). *Tidsskrift f. Planteavl*, **75**, p. 539-548. *Da, e.*

RASMUSSEN Kj., TOVBORG JENSEN S., 1960. Investigations on potash and potash release in danish soils. *Yearbook, 1960, Royal vetr. agric. Coll. Copenhagen*, p. 88-122. *E.*

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 611-624.

ASKOV 1894 : INVESTIGATIONS ON DISPLACEMENT OF APPLIED FERTILIZERS FOLLOWING SOIL PREPARATIONS

J. LINDHARD

Askov Forsøgsstation,
6600 Vejen Danemark

SUMMARY

An investigation has been carried out on the problems of displacement of applied fertilizers in experimental plots from the long-term field experiment *Askov loam field 1894*.

In a barley field and a wheat field resp. an unmanured plot and an adjacent NPK plot each was divided in 19 mini areas, which were sampled separately. From crop and soil analyses it is obvious that transport of applied fertilizers takes place in the ploughing direction and also crosswise to it. This influences the crop inside the unmanured plots, where yields decrease from the border towards the centre. Apart from the guard area the same picture is seen for the yields in the NPK plots, where deficiency in plant nutrients not might be the reason. Probably the better light intensity near the borders of the fertilized plot causes a yield increase over the normal circumstances in the centre.

Normally 70 m² of a 110 m² plot are sampled for yield estimations and analysis. Compared to a centre area of 2 m² the standard yield is evaluated about 10 p. 100 higher for both the unmanured plot and the NPK plot.

The investigations leave the impression that the guard area has controlled the displacement to a great extent.

INTRODUCTION

The long-term experiments at Askov which was established in 1894 have in comparison as many other classical experiments relatively small plots with an area of about 110 m².

Plots being only 110 m² offers large possibilities for displacement of nutrients from one plot to another, a possibility which to a certain degree has been taken in account by an arrangement of guard areas.

The problems of this displacement has been discussed by DORPH-PETERSEN

(1947) who measured the displacement of lime, using the pH values in soil as an indication. Samples taken along a line in ploughing direction showed much larger variation in pH inside the plots than samples taken along lines across the ploughing direction.

DAM KOFOED (1959) investigated the displacement of superphosphate. Labeled superphosphate was given to a plot, 3 × 10 m, at a rate of 1 080 kg/ha. Along a line following the ploughing direction, three metres in the area and 7 1/2 m over the edges, soil samples were taken every metre. After sampling, the soil was cultivated and within a few hours treatments were carried out, simulating a year cultivation work of harrowing and ploughing. After this a set of soil samples was taken, and another « year cultivation » took place. This procedure was repeated 6 times on loam soil and 7 times on sandy soil. After drying and sieving, soil samples was counted directly with a G.M.-tube.

Calculations on the countings showed similar results for the two soil types. After the first « cultivation year » superphosphate was detected 2 1/2-3 1/2 metres outside the border of the fertilized plot and after 6-7 « year cultivations » it was found as far as 7 1/2 metres away.

Relatively large quantities of superphosphate were displaced. After one « cultivation year » 77 p. 100 of superphosphate remained in the plot of loam soil and 18 p. 100 in a guard area 1 m beyond both ends, whilst 5 p. 100 had been transported outside this. After six « cultivations », only 49 p. 100 of superphosphate was left in the plot, 20 p. 100 in the guard area and 31 p. 100 outside. Similar results was found for sandy soil.

Crops sown in the area showed yields corresponding to the results of soil sampling.

The experiment indicates that considerable amounts of soil and phosphate had been displaced over the border, but it must be borne in mind that a plot having fertilizing and soil preparations, sufficient for six years, carried out in a few days and without any phosphate removal by crops may suffer much larger displacement losses than after a normal procedure.

As a supplement to this investigation, soil samples were taken in the long-term field experiment in a line through a phosphorus deficient plot, NK, and the adjacent NPK plot. The phosphorus-index (Ft) was 3 in the NPK plot, however 3 metres from the edge of the NK plot the figure began to fall. This fall did not stop at the edge of the plot, but continued for 2 metres into the NK plot where it stabilised at Ft 1.

DORPH-PETERSEN in his book *Field experiments* (1972) has the following comments on displacement of soil, plant nutrients, diseases and so on : « In very long-term field experiments, having soil preparations crossing the borders of plots, displacements could be of essential importance. In the oldest of long-term experiments, displacement of soil might by now be so extensive that only little of the soil has remained in the same plot all the time. This must be taken in account in the interpretation of observations, especially when the « trend » in soil analyses is evaluated and may serve as an argument against the continuing of long-term experiments during too many years » (my translation).

METHODS

The purpose of the investigation, here presented, was to evaluate the effects of the guard areas which has been used in the long-term experiment.

In two of the loam fields, B_3 and B_4 respective, a pair of adjacent plots was chosen, the one component being normally fertilized and the other which had been left unmanured since 1893. The plots are placed end to end in the ploughing direction.

Figure 1 shows the design of plots with surroundings. In reality the fields B_3 and B_4 are placed some hundred metres apart.

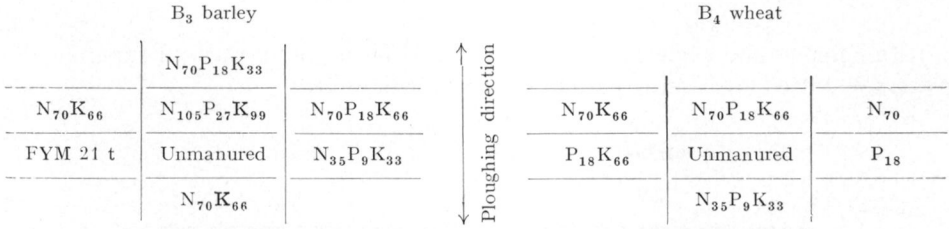


FIG. 1. — *Arrangement of NPK and unmanured plots in the fields B_3 and B_4*

In both ends of the plots, 1.23 m is used as guard area and in both sides 0.89 m. This reduces the total area, 110 m², which is fertilized, to 70 m² from which area the yields are calculated. Between the guard area and the inner plot is a border line about 20 cm wide, which is held free of vegetation.

Indices to the letters N, P and K in figure 1 explain the fertilization in kg of nutrients given per ha and year as an average of a four year rotation with wheat, rootcrops, barley and clover grass. Farmyard manure was given to rootcrops only, but is explained here in tons per hectare and year as an average for the rotation.

In 1965 the field B_3 was grown to barley with undersown clover grass, and B_4 had winter wheat.

At harvest time the area of the plots was divided up into smaller parts (mini areas) from which the crop was harvested and analysed separately.

The system of division is illustrated in figure 2.

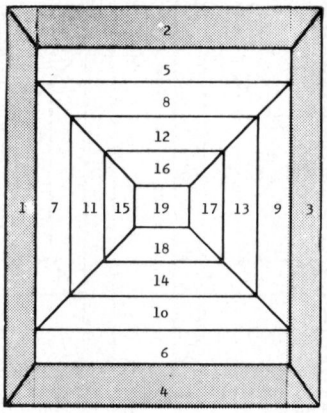


FIG. 2. — *Systeme of mini areas for sampling inside the plot*

19 samples of grain and 19 samples of straw were taken from each plot and their N, P and K content were examinated.

In September 1965, soil samples were taken from the same mini-areas, and examined for organic carbon, Kjeldahl-N, phosphorus index (Ft) and potassium index (Kt) content.

The calculated results are presented as figures in their proper place inside the plot, so simulating a model surface with higher and lower zones for gains and losses respectively of yields and nutrients.

Moreover, the mini areas can be collected into 5 guard areas and a centre plot. When combining these areas, harvest plot sizes varying from 110 m² to 2 m² are available for investigation of the effect of guard areas on the different parameters in question.

RESULTS

In figures 3 and 4, yields of grain and straw are shown for the four experimental plots, the dotted areas representing the normal guard area.

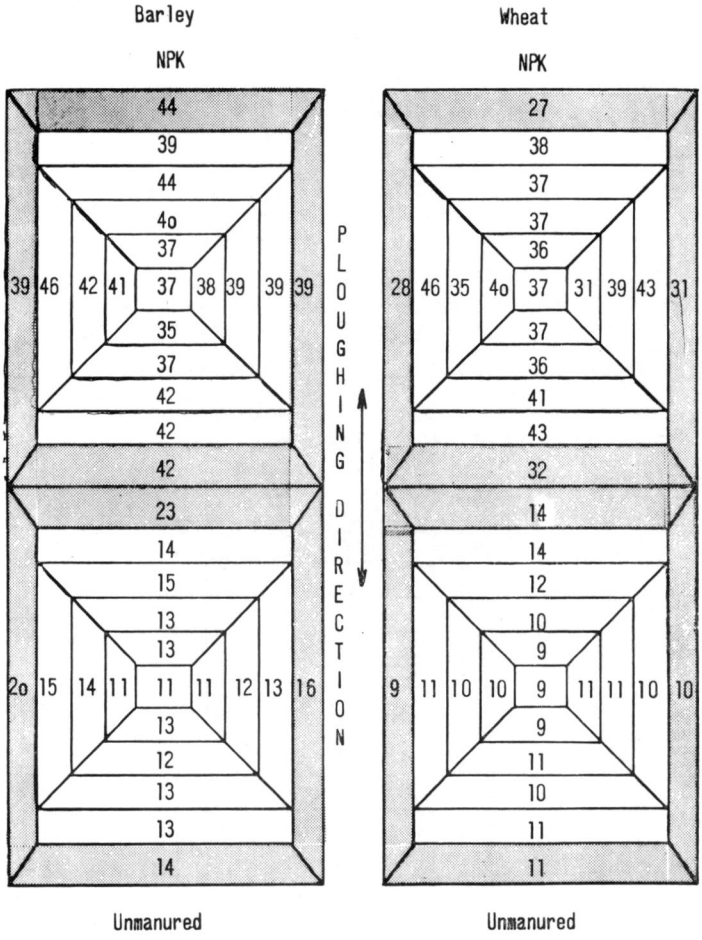


FIG. 3. — *Yield of grain* (15 p. 100 moisture) *in dt/ha*

Generally it must be stated that the guard area accounts for a large part of the variation inside the plots. Nevertheless it is obvious that yields in the plots are decreasing towards the centre area. This might be due to displacement of plant nutrients into unmanured plots but that is not likely for the NPK plots.

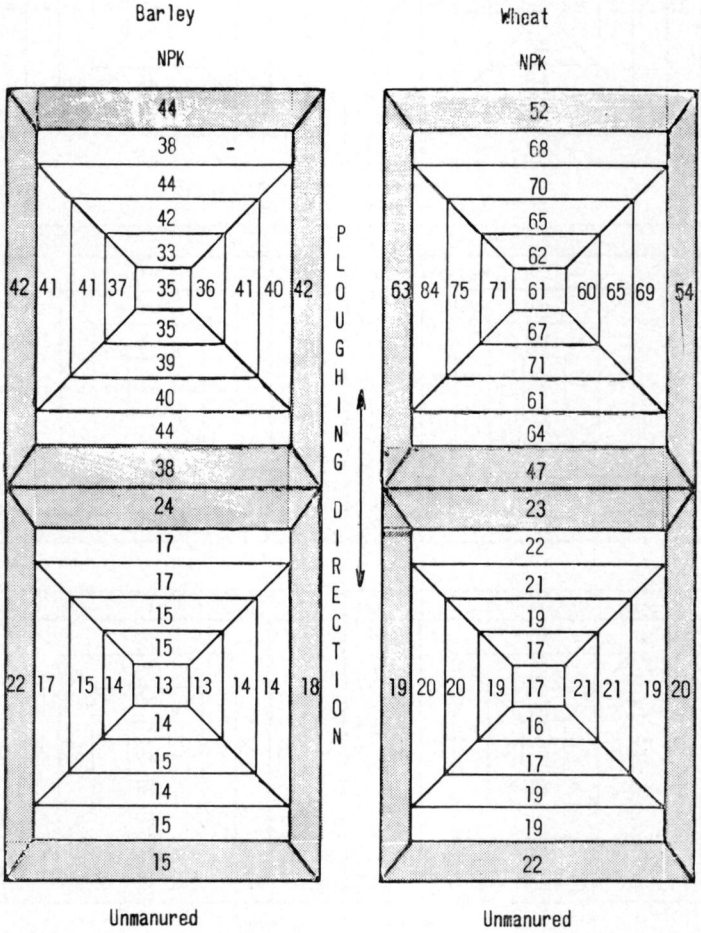


FIG. 4. — *Yield of straw* (15 p. 100 moisture) *in dt/ha*

A similar picture as seen for the yields in figures 3 and 4 is found also for the removals of the plant nutrients by crops (nitrogen phosphorus and potassium) ; this is illustrated in the figures 5 to 7.

In all cases the figures decrease towards the centre area. From earlier findings (DAM KOFOED, 1959) an export from fertilized plots might be expected, and this is also to be seen for guard areas in B_1, at the borders on the neighbour plots N, unmanured, NK and normal field, while for B_3 only the borders on unmanured and NK show a similar effect. In contrast to this the decrease towards the centre is difficult to explain. Concerning B_3, part of the explanation might be the fact that under-

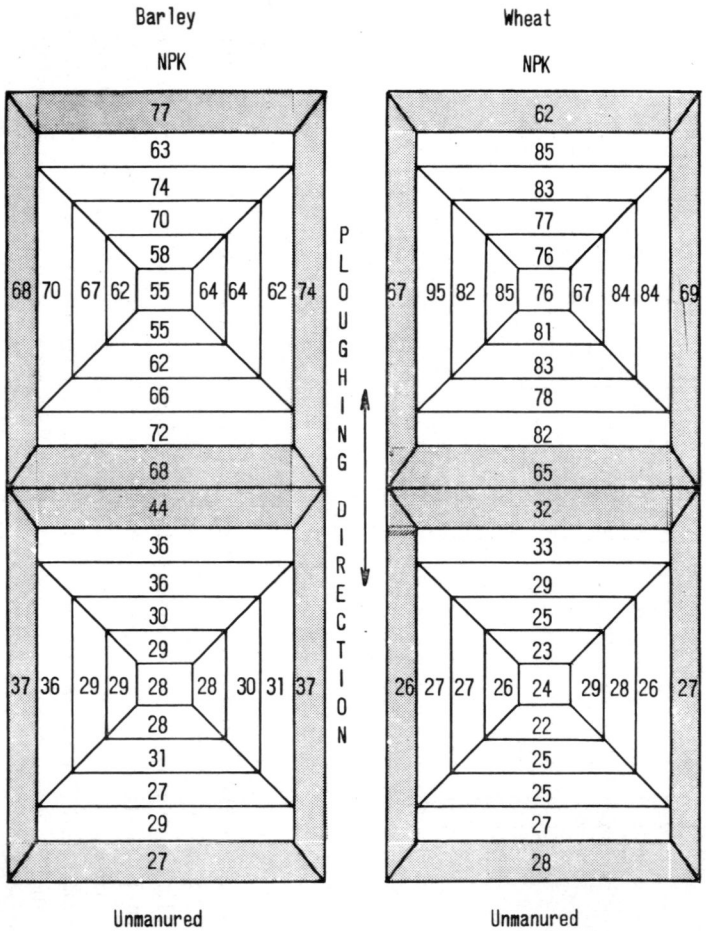


FIG. 5. — *Nitrogen removed by the crops, N, kg/ha*

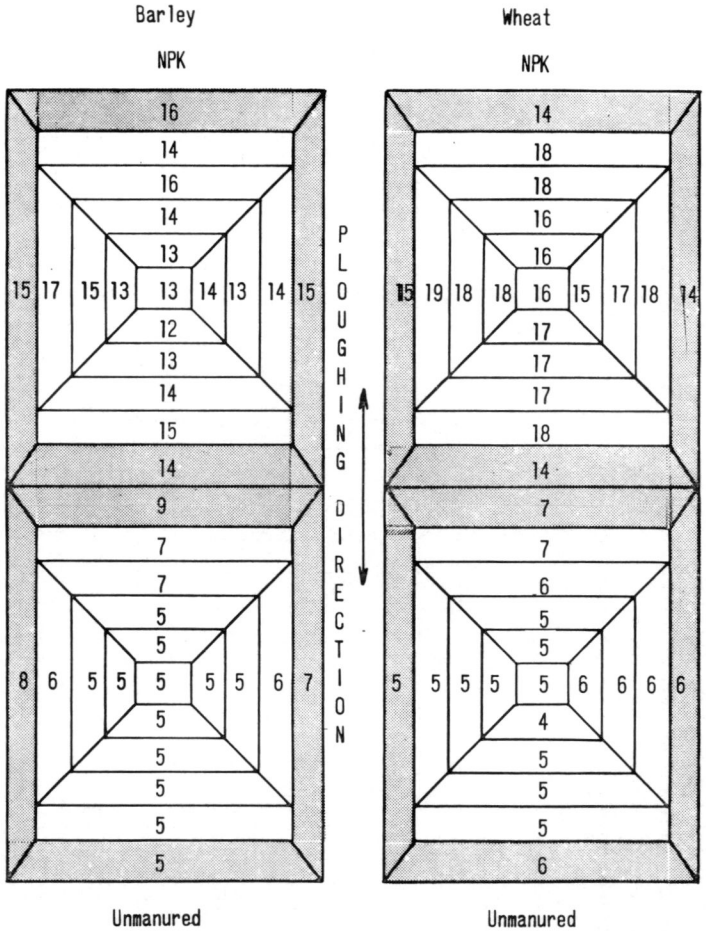


FIG. 6. — *Phosphorus removed by the crops, P, kg/ha*

sown clover grass is developing badly under heavy fertilized barley, because of lack of light. It would be reasonable to suppose a better supply of light available to the clover grass near the borders than in the centre of a heavy growth.

This explanation may possibly apply too for the wheat because of some lasting effect to the soil as a result of the uneven growth of clover grass. This might be the case if the yield in the following year shows the same picture as the barley crop. For

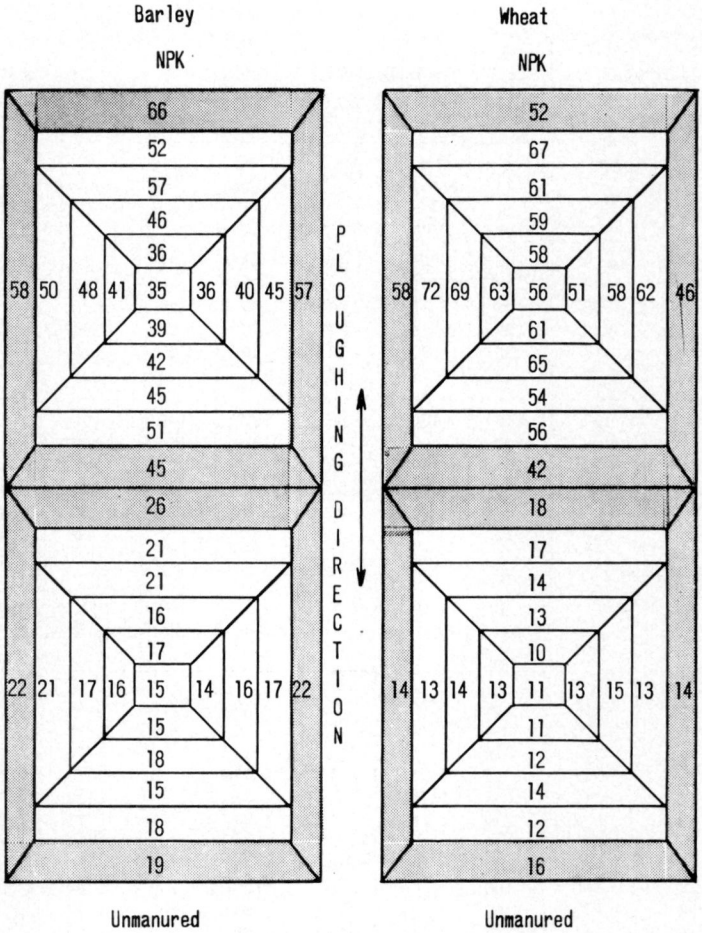


FIG. 7. — *Potassium removed by the crops, K, kg/ha*

this we have no evidence in our experiment, but from an experiment with nitrogen for wheat, as a cover crop for lucerne, DILZ (1969) reported heavy depression of lucerne growth with increasing nitrogen supply. This depression, though partly reduced after harvest, resulted in a smaller yield of lucerne the following year. As the grassfield is followed by wheat at Askov this explanation sounds probable for B_4.

It follows from this that the centre area should give the most reliable result in comparison to yields obtained from whole fields resp. unmanured and fully fertilized.

A calculation of yields going out from different plot sizes *i.e.* using guard areas of different width shows the influence from outside on yields and nutrient removals.

TABLE I

Yields (dt/ha) *and removal of nutrients* (kg/ha) *with barley and wheat using various plot areas Absolute and in relation to standards from 70 m² plots*

	Plot		B_3 Barley				B_4 Wheat			
			unmanured		NPK		unmanured		NPK	
	group nr.	area m²	yield	N removed	yield	N removed	yield	N removed	yield	N removed
Absolute	1	110	32	33	81	68	31	26	99	76
	2	70	28	31	81	66	30	27	108	82
	3	55	28	31	80	65	29	26	108	82
	4	29	27	29	77	63	29	26	104	80
	5	12	26	29	73	59	27	25	101	77
	6	2	24	28	72	55	26	24	98	76
Relative	1	157	115	106	100	102	103	96	92	93
	2	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	3	79	100	100	99	98	97	96	100	100
	4	41	96	94	95	95	97	96	96	98
	5	17	93	94	90	89	90	93	93	94
	6	3	86	90	89	83	87	89	91	93
			P removed	K removed	P removed	K removed	P removed	K removed	P removed	K removed
Absolute	1	110	6	19	15	50	6	14	16	57
	2	70	6	18	14	46	5	14	18	62
	3	55	6	17	14	45	5	13	17	62
	4	29	5	16	14	41	5	13	17	61
	5	12	5	15	13	38	5	12	16	58
	6	2	5	15	13	35	5	11	16	56
Relative	1	157	100	106	107	109	120	100	89	92
	2	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	3	79	100	94	100	98	100	93	94	100
	4	41	83	89	100	89	100	93	94	98
	5	17	83	83	93	83	100	86	89	94
	6	3	83	83	93	76	100	79	89	90

Excluding the yields obtained from the total area, the normal harvest plot (group nº 2) gives the highest yields, and cutting away the ends of that plot (group nº 3) gives only a slight reduction. Using group nº 2 as a standard we get the relative figures which show us there is about 10 p. 100 difference between the standard yields and yields calculated for the centre area. This difference is due to displacement of nutrients in unmanured plot and to extra light intensity at the borders of NPK plots.

SOIL ANALYSES

Results of the soil analyses are shown in the figures 8 to 11.

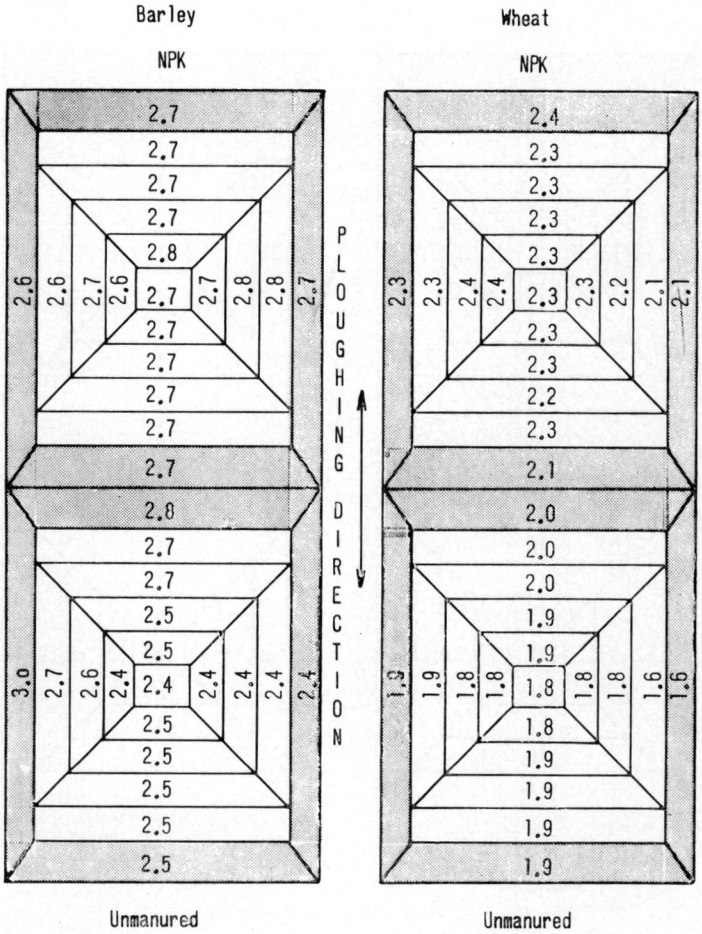


FIG. 8. — *Humus content of the soil* (p. 100 C × 1,72)

The humus content shows remarkably higher values in B_3 than in B_4. Samples were taken in September when grass and clover plants were alive and fine roots from the wheat plants had suffered decay. As for the difference between fertilized and unmanured this is bigger in B_4 than in B_3 probably because at that time the clover grass in the NPK plot of B_3 was still somewhat depressed after the barley lately harvested.

In the guard areas some increasing effect is seen from the FYM plot and the NPK plot into the unmanured plot of B_3 and a decreasing effect to the unmanured

plot in B_4 from the P plot. Generally some effect is seen crossing the border from the NPK plot to the unmanured in both fields.

As for the nitrogen content in figure 9, the same picture is nearly seen, but the difference between B_3 and B_4 is less marked.

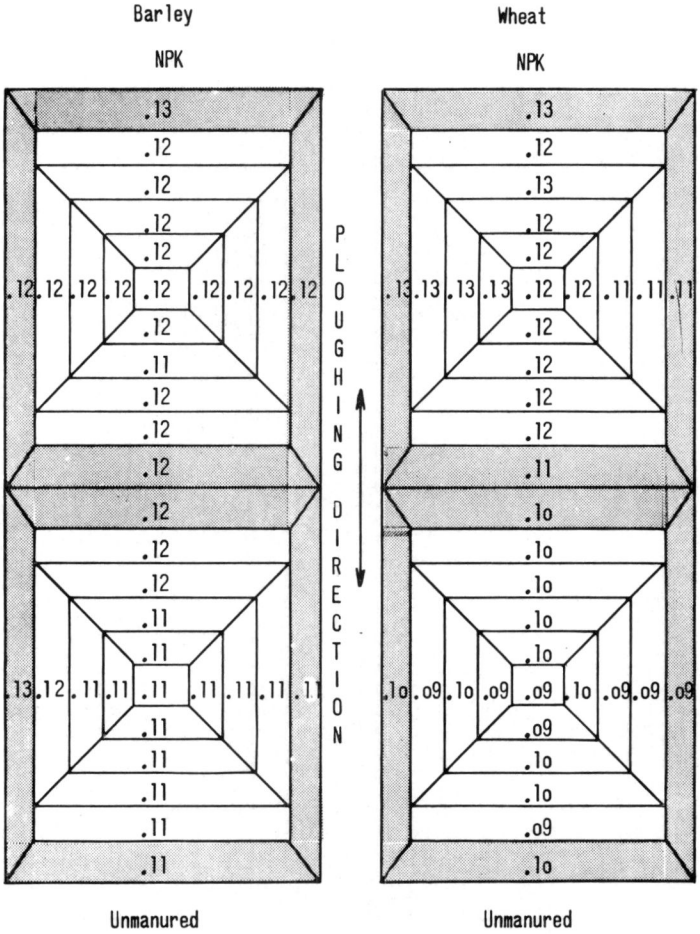


FIG. 9. — *Total-N content of the soil* (p. 100 N)

The $\frac{C}{N}$ relation is much wider in B_3 than in B_4 presumably because of the living root materials in B_3.

These results emphasize the importance of knowing the sampling date.

In figure 10 are illustrated the variations in phosphorus indices.

The phosphorus contents show a big variation between NPK and unmanured plots but most of the displacement effect is caught by the guard area. Some effect is seen from the neighbours P and NK in B_4 and in B_3 from FYM and NK.

As for the potassium indices shown in figure 11 the difference between NPK and unmanured is not so marked, especially not for B_3.

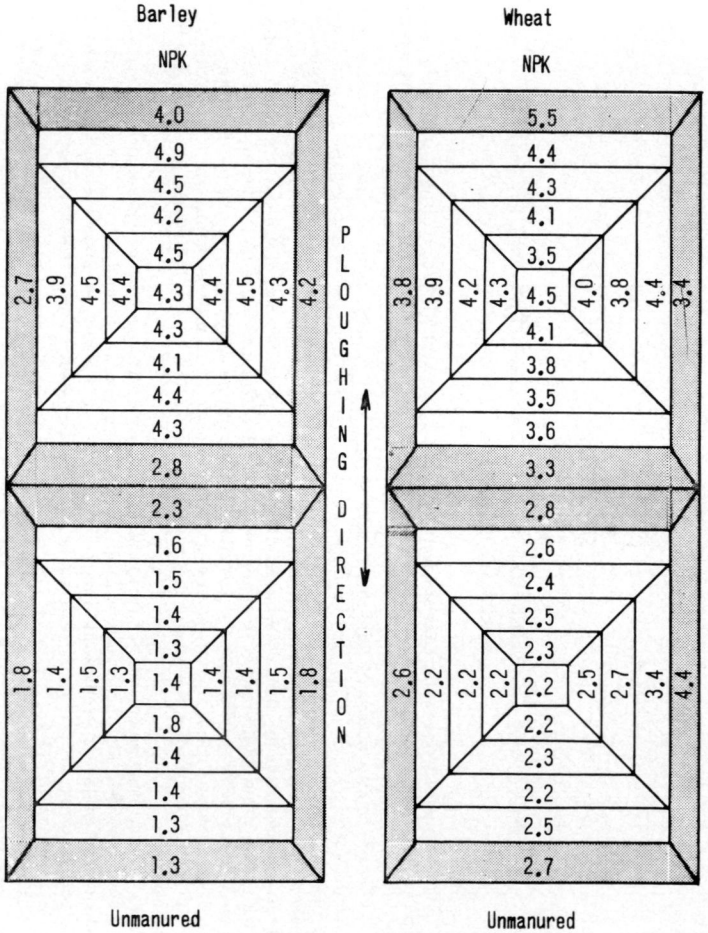


FIG. 10. — *Phosphorus index of the soil* (Ft = mg P/33 g of soil)

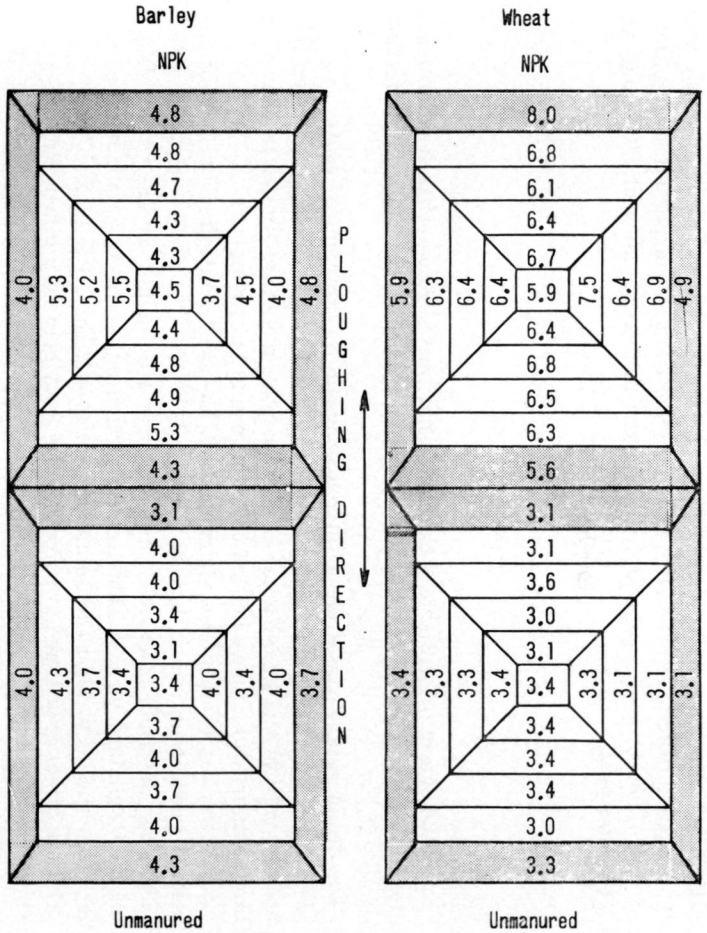


FIG. 11. — *Potassium index of the soil* (Kt = mg K/100 g of soil)

It is likely that the crops removed the greater part of what was available and so the measured difference originates from decayed roots. Of neighbour effects there is not very much to say, except probably for the decreasing effect of the N plot on the NPK plot in B_1.

CONCLUSIONS

From the figures presented here the conclusion must be drawn that displacements of applied fertilizers, in this experiment, take place both in the ploughing direction and across it.

The displacement causes yield differences inside the unmanured plots.

For NPK plots displacement of nutrients also causes yield differences but apparently only in the guard area. Inside the plots a picture similar to that seen in the unmanured plots may be due to variations in light supply.

Effects of displacement to a great extent has been controlled by help of the traditional guard area.

Choosing the yield calculated on the centre area (2 m²) as the « true yield » makes the « standard yield » calculated on the normal 70 m² basis about 10 p. 100 higher. This applies to both the unmanured plots and the NPK plots.

Using a larger guard area apparently would not help very much, and this work shows that continuing in the traditional way gives valuable results which are quite acceptable.

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

ASKOV 1894 : RECHERCHES SUR LE DÉPLACEMENT DES ENGRAIS APRÈS PRÉPARATIONS DU SOL

Nous avons fait des recherches sur le problème du déplacement des engrais appliqués sur des parcelles d'expérimentation dans l'essai de fertilisation de longue durée d'Askov (Askov loam field, 1894).

Dans un champ d'orge et dans un champ de blé, une parcelle non fertilisée et une autre, adjacente, fertilisée avec NPK, ont été l'une et l'autre subdivisées en 19 micro-parcelles sur chacune desquelles on a prélevé des échantillons. Des analyses du sol et de la récolte, il ressort que le déplacement des engrais appliqués se fait dans le sens du labour et perpendiculairement à ce dernier. Ce déplacement influe sur la productivité des parcelles non fertilisées, dans lesquelles la production diminue quand on se rapproche du centre. Si on excepte la bordure de protection, on constate les mêmes effets dans les parcelles NPK ce qui ne peut être expliqué par la carence en éléments nutritifs. Probablement, la plus grande intensité de lumière existant au pourtour de la parcelle fertilisée entraîne une production plus élevée qu'au centre qui lui, est soumis à des conditions normales.

On fait habituellement un échantillonnage de 70 m² sur une surface parcellaire de 110 m² à fin d'analyse et d'évaluation de la production. Si on évalue le rendement d'après un échantillon de 2 m² prélevé au centre de la parcelle, on observe que le rendement estimé sur 70 m² lui est supérieur de 10 p. 100 ; ceci est vrai à la fois pour la parcelle non fertilisée et pour celle ayant reçu la fertilisation NPK.

Ces recherches semblent indiquer que la bordure de protection a bien réussi à contrôler le déplacement des engrais.

ZUSAMMENFASSUNG

ASKOV 1894 : UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE VERSCLEPPUNG VON DÜNGEMITTELN BEI DER BODENBEARBEITUNG

Auf der Dauerversuchsanlage « Askov Lehmboden 1894 » wurden Untersuchungen zum Problem der Düngemittel-Verschleppung bei der Bodenbearbeitung durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurden in einem Gersten- und Wiesenschlag die ungedüngte und die NPK-gedüngte Parzelle in 19 Kleinflachen unterteilt. Die Pflanzen- und Bodenanalysen zeigen, dass die Düngemittelverschleppung sowohl in Pflugrichtung als auch quer dazu erfolgt. Diese Verschleppung äussert sich auf der ungedüngte Parzelle in der Weise dass die Pflanzenerträge vom Parzellenrand zur -mitte hin abnehmen. Abgesehen von Ubergangsbereich zeigt die NPK-Parzelle das gleiche Ertragsbild, obgleich Nährstoffmangel eigentlich nicht der Grund dafür sein kann. Wahrscheinlich ermöghlicht die höhere Lichtinsität im Randbereich der gedüngte Parzelle eine gegenüber der Parzellenmitte höheren Ertrag.

Normaler Weise werden 70 m² der 110 m² Parzellenflächen für die Ertragsermittlung und die Analysen beprobt. Im Vergleich zu 2 m² Fläche aus der Parzellenmitte liegt der Ertrag bei der obigen Ermittlung sowohl bei der ungedüngte als auch der NPK-Parzelle um etwa 10 p. 100 höher.

Diese Untersuchungen deuten darauf hin, dass der Randzone für die Düngemittelverschleppung eine grosse Bedeutung zukommt.

РЕЗЮМЕ

Асков 1894 — изучение распространения влияния удобрений после подготовки почвы.

Ж. ЛИНДГАРД.

Изучалось распространение влияния удобрений вносившихся на экспериментальные делянки, выделенные из долгосрочных опытов Аскова (Askov, *Loam field*, 1894). Два соседних поля ячменя и пшеницы, первое не получавшее удобрения, второе — удобренное NPK были разделены на 19 делянок, на каждой из которых пробы собирались по отдельности. Анализы этих проб почвы и урожая показали, что действие вносящихся удобрений распространяется вдоль пахоты и перпендикулярно к ней. Это распространение влияет на прдуктивность соседних неудобренных делянок, на которых продукция уменьшается по мере приближения к центру. За исключением предохранительных краев, такое-же действие отмечалось на делянках NPK. Возможно, что более сильная интенсивность освещения, существующая по краям делянки и вызывает увеличение продуктивности в центре, находящимся в условиях нормальных.

На делянках размерами в 110 м² пробы для анализов и оценки продуктивности собирались обычно с площади в 70 м². Сравнение нормальной продукции с продукцией центральной делянки размерами в 2 м², показывает что нормальная продукция превышает эту последнюю на 10 %; это верно, как для почв неудобренных, так и для почв получавших NPK.

Полученные результаты приводят к мысли, что предохранительные края имеют сильное влияние на распространение удобрений.

ACKNOWLEDGEMENT

I wish to express my sincere gratitude to Dr. E. R. Page, Wellesbourne (U. K.) for his excellent help in preparing the english manuscript.

LITTERATURE

DAM KOFOED A., 1959. Influence of mechanical soil preparation on displacement of superphosphate, investigated by help of labeled phosphate. *Tidsskrift for Planteavl*, **63**, 285-306. *Da* (*e*).

DILZ K., 1969. Nitrogen fertilizing of cereals 18. Effect of CCC and nitrogen on winter wheat and the following effect on undersown legumes. *Stikstof*, **61**, 15-19. *Du.*

DORPH-PETERSEN K., 1947. Experiments on lime and marl. *Tidsskrift for Planteavl*, **51**, 1-113. *Da.*

DORPH-PETERSEN K., 1972. *Field experiments.* Statens Planteavlsudvalg, Lyngby 1972, 429 pages. *Da.*

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 625-642.

THE APPLICATION OF MINERAL AND ORGANIC FERTILIZERS ON TWO CROP ROTATIONS

(POLAND-SKIERNIEWICE 1923)

B. DOBRAŃSKY

Institute of Pedology and Agricultural Chemistry,
Akademia Rolnicza W Warszawie,
(Poland)

The experimental field at Skierniewice was established in 1921. About 30 hectares of arable land was then allotted to the Agricultural University of Warsaw for this purpose and the necessary premises were constructed. There is a green house for 2 000 pots and a meteorological station where observations have been conducted since 1921. A small laboratory houses facilities for carrying out analyses of soils and plants.

TABLE I

Average annual and monthly rainfall, temperature, and insolation (1921-1970)

Month	Rainfall mm	Temp. °C	Insolation hours
January	20.7	— 3.0	48.2
February	23.5	— 2.5	60.4
March	23.3	1.4	131.0
April	36.8	7.6	167.9
May	51.5	13.5	233.5
June	65.8	16.8	253.2
July	82.5	18.7	243.8
August	72.0	17.7	219.9
September	44.9	14.0	170.6
October	34.0	8.3	118.2
November	39.1	3.2	48.4
December	26.8	— 1.1	37.3
Annual	520.9	7.9	1 723.4

Skierniewice is located about 66 km SW of Warsaw, in the Great Valley Belt of Poland. Climatic conditions are typical of central Poland ; the land is flat and drained.

The soils of the experimental field are podsolic of glacial origin. The plough layer contains loamy sand ; at the depth of 50 cm there is a layer of loam. The soils contain about 7 p. 100 of clay particles (< 2 μ). Organic carbon content is 0,7 to 0,75 p. 100. They are good rye and potato soils.

Some meteorological data are given in table 1.

The rainfall is relatively small, and its distribution, especially for cereals, is not favourable. In comparison to western Europe, the rainfall is remarkably lower ; average annual rainfall in four agricultural districts in Holland is 726 mm, in central France (Tours) 670 mm, and in Harpenden, England (in the area of Rothamsted) 725 mm. Vegetation period is also shorter, in comparison to western Europe ; in Skierniewice it lasts 213 days ; annual sunshine hours = 1723.

EXPERIMENTAL DESIGN

The experimental works proceed basically in two main directions :

- long-term permanent experiments ;
- experiments designes to meet the present – day fertilizer demands of agriculture.

The permanent experiments have been conducted since 1923. Their purpose is to examine :

— crop level of plants cultivated under different fertilizing conditions ;

— changes in physico-chemical, chemical and biological conditions of the soil, resulting from the fertilizer application ;

— behaviour of the cultivated plants, such as rye, potatoes and recently winter wheat also, under the conditions of monoculture (fields D). These experiments are now conducted on the area of about 5 hectares.

A separate part of the permanent experiments constitute investigations with the object of recovering the productivity of soils depleted in nitrogen, phosphorus or potassium and those acidified after lack of nutrient elements or lime supply since 45 years. These experiments were initiated in 1968 and are being conducted on parts of Experimental Fields A (only mineral fertilizing) and D (monocultures).

Permanent experiments conducted since 1923

The systematic pattern of fertilizer objects in these experiments can be explained by the views on experimental procedure held at that time ; it comprises basically the following fertilizer treatments :

1. O (no fertilizing)	4. PK
2. CaNPK	5. NP
3. NPK	6. NK

The size of individual plots is 50 m² and there are 3 replicates on fields A. Each field comprises 19 plots ; O objects is in 4 replicates.

The fields with permanent experiments have the following treatments combinations :

Fields A I — A IV : arbitrary rotation without legumes ; only mineral fertilizing ; fertilizer objects as given above.

Fields A V — A VIII : similar conditions, except that here all the plots are limed once every four years with 1 600 kg/ha CaO, besides the fertilizers applications *i. e.* :

1. Ca	4. CaPK
2. CaNPK	5. CaNP
3. NPK	6. CaNK

Fields A IX — A XI : similarly as A V — A VIII, except that once in four years a legume plant is cultivated.

Fields AF I — AF III : they differ from Fields A I — A IV in that the nitrogen source is ammonium sulphate, a fertilizer of a markedly acidifying property ; thus, the soil of not limed plots is highly acid, although all the plots (except NPK treatment) were limed twice, in 1949 and 1952.

Fields D are experiments on monocultures : field D V = potato monoculture and field D VI = rye monoculture. In 1972, wheat monoculture was started.

The number of treatments on monocultures is somewhat greater, *i. e.* 10 : besides the 6 treatments mentioned above, there is one with only farm manure application (20 tons/ha/an) and others which consist of mineral nitrogen fertilizers supply applied alone in different forms. In experiments D, the number of replicates of each fertilizer treatment is 5.

Fields E have a similar experimental pattern as Fields A ; the difference is that plants growing here (potatoes, barley, legumes, wheat and rye) are cultivated according to a modified Norfolk rotation scheme. Thus, besides mineral fertilizing, once every five years organic manure is applied and a legume is grown once every five years too.

On Fields A and D, Mineral fertilization has been applied up to 1935 at following doses : 50 kg N, 50 kg P_2O_5 and 60 kg K_2O per hectare. Later (up to 1961), the doses were 30 kg N, 30 kg P_2O_5 and 60 kg K_2O. Nitrogen was applied as sodium nitrate ; phosphorus as ordinary superphosphate, and potassium as low percent potassium salt.

In 1961, doses were raised and up to 1975 the following doses : 60 kg N, 48 kg P_2O_5 and 72 kg K_2O were given per hectare. Nitrogen is now applied as ammonium nitrate ; phosphorus as superphosphate, and potassium as concentrated potassium salts (50-60 p. 100).

RESULTS

The permanent experiments carried out for 50 years now remarkably influenced soil fertility, which, in turn influenced crops level. Plant rotation or cultivation in monoculture also had a marked influence on the yield of crops.

All these effects are illustrated in the following tables where the yields of rye, potatoes, wheat, barley and oats from permanent experiments are presented for chiefly three years periods each.

Effects of treatments on Rye crop

The rye crop cultivated in monoculture (D VI) is markedly lower than that of rye cultivated in arbitrary rotation (A I-A IV) and still lower than that grown on modified Norfolk rotation scheme (Field E).

Rye has low sensitivity to soil pH in each of the three fields.

The effect of annually manure application (20 t/ha) is relatively weak, in spite of the fact that in this case a greater number of nutrients is introduced (about 100 kg N, 50 kg P_2O_5 and 120 kg K_2O per hectare) than in treatments with mineral fertilizers. only. There is a possibility that a certain amount of nitrogen is leached or undergoes denitrification. In spite of similar soil conditions and the same fertilization scheme, the rye crop cultivated in monoculture (D VI) is markedly lower than in rotation (AI-A IV).

The lack of phosphorus and potassium supply has a declining yield effect on rye crops, not earlier than after 40 years in arbitrary rotation (field A), already after about 30 years in monoculture (field D VI). Generally, this reaction is more apparent with phosphorus than with potassium.

The yields of rye cultivated at modified Norfolk rotation (Field E) are higher that in rotation, even more so in monoculture, in spite of the fact that rye is grown here in the fifth year after manure and in the second year after legumes. Especially

TABLE 2

Rye grain yields in 100 kg per hectare from permanent experiments

Field	Years	Treatments						
		O	CaNPK	NPK	PK	PN	KN	Manure
A I-A IV	1924-26	18.2	24.9	23.9	19.1	22.2	23.0	
	1954-58	16.7	26.3	25.1	18.2	24.9	25.3	
	1963-65	14.5	32.3	32.5	15.4	31.2	29.5	
	1968-69	13.6	34.2	35.2	13.8	31.4	31.4	
	1971-73	15.7	37.5	36.1	18.4	35.1	31.9	
D VI	1925-27	14.6	23.4	23.0	16.3	21.3	20.3	19.5
	1936-38	11.5	18.3	17.4	13.3	16.3	15.0	16.5
	1949-51	10.7	17.1	14.7	11.2	15.6	12.1	19.7
	1968-69	13.1	26.1	26.2	12.2	20.6	18.7	23.3
	1971-73	14.1	28.0	28.9	15.4	20.0	19.4	26.2
E	1969-70	19.8	27.4	29.3	22.8	27.3	22.0	
	1971-73	27.0	40.7	41.3	30.8	34.6	32.9	

striking differences to the advantage of the rye crop at Norfolk rotation can be seen in zero and PK treatments. Thus, it can be concluded that the action of a legume plant is responsible for this phenomenon.

Although potatoe varieties at various periods of time were different, the same variety was cultivated at the same time in all the fields.

Effects of treatments on Potato crop (table 3)

A large interaction of organic and mineral fertilization is observed in fields E, where potatoes were always grown on manure. A marked reaction to potassium fertilizing can be seen in Fields A.

The yields of potatoes cultivated in monoculture decreased in the sixties to a very low level as a result of strong infestation with potato nematodes in the soil. After a four-years interval (1968-1971) the yields remarkably increased in the first year ; however, the following year they remarkably decreased again because of another nematodes infestation.

Effects of treatments on winter wheat (table 4)

The yields on mineral fertilizing only (Field A) are relatively small and this may explain the small response to phosphorus and potassium.

With higher yields (Field E), the response to fertilization especially with phosphorus is remarkable. The influence of legume forecrops on the yield level (in O combination and PK treatment without mineral nitrogen) can be seen.

Effects of treatments on Barley crop (table 5)

Differences in the yields from Fields A and E are similar to those of wheat (barley on Field E is cultivated after potatoes on manure). However, barley has a stronger response to soil pH that wheat does (see the yields on the CaNPK and

TABLE 3

Potato yields in quintal per hectare (tubers) *from permanent experimental fields*

Field	Years	Treatments						
		O	CaNPK	NPK	PK	PN	KN	Manure
A I-A IV	1924-26	90	150	153	123	108	137	
	1953-55	130	177	163	158	134	174	
	1962-65	94	207	211	128	114	147	
	1972-73	117	274	257	118	125	220	
D V	1924-26	64	91	89	84	82	82	86
	1950-53	85	84	112	108	75	119	147
	1963-65	62	112	128	63	67	85	125
	1966	18	58	66	25	37	33	38
	1967	43	68	91	46	38	45	124
	after 4 years interval							
	1972	138	248	255	185	165	240	230
	1973	82	117	117	102	110	151	99
	1974	20	133	81	21	46	27	99
E	1969-70	165	183	181	143	137	195	
	1971-73	295	342	328	309	329	323	

TABLE 4

Winter wheat (grain) *yields in quintal per hectare from permanent experimental fields*

Field	Year	Treatments					
		O	Ca-NPK	NPK	PK	PN	KN
A V-A VIII	1970-72	12.7	28.1	24.1	16.3	26.1	27.9
E	1971-73	25.8	34.9	36.0	32.1	32.7	29.6

TABLE 5

Barley grain yields in quintal per hectare from permanent experimental fields

Field	Periods	Treatments					
		Ca	Ca-NPK	NPK	CaPK	CaPN	CaKN
A	1971-72	10.0	28.5	19.7	19.6	19.1	19.2
E	1969-70	25.1	42.3	36.8	27.1	38.7	38.1
	1971-72	23.2	37.5	29.4	26.7	35.4	31.5

NPK treatments ; soil pH is 5.6 on CaNPK soil, and 4.7 on NPK). Fields A show large response of barley to lack of phosphorus and potassium fertilization (see treatments CaPN, CaKN and CaNPK).

Effects of treatments on oats crop

Oats are cultivated only on fields A. Marked differences in crop yields result here mainly from low soil pH due to regular application of ammonium sulphate on AF fields. The pH of CaNPK soil from field AF is 5.2, whereas the NPK one is 4.2. It should be mentioned here that in the years 1947 and 1952 the soils of all the plots on fields AF were limed — with the exception of treatment NPK — because of large decreasing yields. Marked response of oats to lack of phosphorus supply can be seen on field A I-IV (see yields on NK and NPK treatments.

TABLE 6

Oat yields in quintal per hectare from the permanent experimental fields

Field	Years	Treatments					
		O	Ca-NPK	NPK	PK	PN	KN
A I-IV	1969-70	11.4	27.9	24.7	14.2	20.7	14.6
AF I	1971-73	9.8	27.2	6.6	12.0	18.1	15.7

MEANS FOR OVERCOMING YIELD REDUCTION AND NEGATIVE EFFECTS OF INADEQUATE FERTILIZATION AND ROTATION

In relation to soil fertility changes and their consequences, a question occurred : what kind of treatments should be applied to restore full productivity of the soil which was inadequately fertilized or on which a proper rotation was not applied. In attempt to answer to these questions studies were initiated on a part of long-term permanent experiments, *i.e.* A V and A VII (rotation without legumes, only mineral fertilization), and on a part of D V fields (potato monoculture) and fields D VI (rye monoculture).

The treatments aiming to restore full soil productivity included : — application of organic manure and introduction of legumes on the fields which did not receive such treatment for 45 years (fields A) ; — liming on the plots which were not limed throughout that period ; — nitrogen, phosphorus and potassium supplies on the

soils which were not treated with those elements ; increasing doses were applied in this case ; — cultivation of wheat on field D V (after potato monoculture) in monoculture for four successive years.

The above investigations are being continued and the first results are as follows.

The effect of manure and legumes on soils unmanured with organic fertilizers

Red clover was sown on fields A V and A VII and after the second cut farm manure was spread in the amount of 30 tons per hectare and plowed in. Crop yields in four successive years after the application of such organic supply are given in table 7.

TABLE 7

Grain or tuber yields in quintal per hectare

Year	Plant	M (mineral fertilization) org. + min. (mineral and organic fertilization)	Fertilizer treatment		
			CaNPK	NPK	LSD
1st year	rye	M	29.7	31.2	3.24
		org. + min.	40.0	39.2	
	potato	M	162.5	155.2	30.3
		org. + min.	207.0	186.0	
2nd year	winter wheat	M	34.3	34.4	2.85
		org. + min.	45.2	42.8	
	potato	M	106.9	101.2	13.9
		org. + min.	127.0	119.0	
3rd year	rye	M	37.6	36.4	3.67
		org. + min.	38.0	42.8	
	winter wheat	M	26.4	26.8	3.20
		org. + min.	27.2	26.4	
4th year	rye	M	35.2	32.8	3.10
		org. + min.	30.8	34.8	
	potato	M	260.0	269.2	25.7
		org. + min.	253.2	258.8	

Manure supply with burying stubble and roots of red clover brought about, especially in the first two years, led to yield increase, compared with mineral fertilization only. It is interesting that yield increase was markedly higher for cereals in the first year, by about 32 p. 100 (and in the second year, by about 29 p. 100) than for potatoes, where the increase did not exceed 18 p. 100.

Interaction of mineral fertilizers and organic manure in conditions of rye and wheat monocultures

Similar experiments were performed on fields D V and D VI, except that, compared with the previous experiments, mineral fertilizers (60 kg N, 48 kg P_2O_5 and 72 kg K_2O per hectare) were added to soils on the plots fertilized with 20 t/ha manure annualy. The results are presented in table 5.

TABLE 8

Rye, wheat and potato yields in 100 kg per hectare

Field	Years after manure application	Treatment		
		CaNPK	Manure	Manure + min. fert.
D VI Rye	1	29.9	24.5	32.2
	2	22.4	22.1	30.2
	3	19.3	16.2	22.4
	4	26.7	24.3	28.6
	5	25.7	22.4	22.8
	Average	24.8	21.9	27.2
D V Winter wheat during 4 years interval in potato monoculture	1	39.0	34.0	45.0
	2	20.5	22.1	25.9
	3	26.4	13.1	26.6
	4	15.9	9.0	17.1
	Average	25.4	19.6	28.7
D V Potatoes after 4 years interval	5	248.2	230.4	251.3

The yields were always higher with mineral fertilizers only than with manure only, although in the latter a greater amount of basic nutrient elements was added (about 100 kg N, 50 kg P_2O_5 and 120 kg K_2O/ha). Interaction of mineral fertilizers and manure is high, and negative effects of cultivating wheat in monoculture are more pronounced with manure than with mineral fertilization.

The effects of liming on soils unlimed during 45 years

In the permanent experiments, up to 1961, sodium nitrate was used as a source of nitrogen, superphosphate as a source of phosphorus, and mainly low percent potassium salts as a source of potassium. Although these fertilizers do not acidify the soil, as it is indicated by experiments conducted in Rothamstead for a longer period of time than in Skierniewice, the difference in pH of soils from CaNPK and NPK treatments was remarkable. According to pH determinations made in 1961, pH of the CaNPK soil was 5.9 on field A V and 5.6 on field A VII, whereas pH of the NPK soil was 4.75 on both fields. At the beginning of studies on the recovery of soils on per-

manent experiments, pH of the NPK soils from fields A V and A VII was 4.5 and CaNPK soil pH of both fields was 6.1. A number of NPK plots of both fields were limed with 1 800 kg CaO per hectare (= NPK + Ca_1) or 3 600 kg CaO (= NPK + Ca_2). The lime was applied in the form of calcium carbonate ($CaCO_3$). In the course of four successive years after liming soil, pH was measured after harvesting the plants. The results are presented in table 9.

For clarity sake it should be noticed that the soil with CaNPK treatment has been limed every four years with 1 600 kg CaO per hectare since 1923. The soil of this experiment was limed in the autumn of the third year after liming,

TABLE 9

Soil pH in the successive years after liming

Years after liming	CaNPK	NPK	NPK + Ca_1	NPK + Ca_2
		Field A V		
1	6.1	4.5	5.2	6.2
2	5.9	4.4	5.2	6.0
3	6.2	4.5	5.0	5.7
4	7.0	4.3	4.4	4.8
		Field A VII		
1	6.1	4.5	5.7	6.4
2	6.0	4.3	5.5	6.2
3	6.2	4.3	4.6	5.7
4	6.8	4.3	4.5	4.8

TABLE 10

Crop yields in quintal per hectare in relation to liming

Years after liming	Plant	CaNPK	NPK	NPK + Ca_1	NPK + Ca_2	LSD
			Field A V			
1	potatoes	162.5	148.8	149.2	155.2	31.3
2	wheat (grains)	34.3	28.0	31.6	34.4	2.85
3	rye (grains)	27.6	32.4	41.6	36.4	3.67
4	potatoes	260.0	229.2	244.8	253.2	25.7
			Field A VII			
1	rye (grains)	29.7	31.2	30.0	31.2	3.24
2	potatoes	106.9	72.0	96.8	101.2	13.9
3	wheat (grains)	26.4	22.0	22.0	26.8	3.20
4	rye (grains)	35.2	32.8	41.2	39.6	3.10

in accordance with the 4-year cycle, and this is why pH of the soil of CaNPK object raised in the fourth year.

It can be seen that single treatment on strongly acid soil with lime produced only a small effect : pH of the soil limed with 1 800 kg CaO per hectare was, after four years, already at the level of the non limed soil ; even at double dose of CaO the soil became fairly strongly acidified after four years.

On the contrary, when lime was applied regularly every four years, pH remained fairly high.

Although strongly acid soil after a single lime treatment became strongly acid already after four years, the yields of plants grown here were, in general, significantly higher than on a soil non limed regularly (object NPK), as it can be seen in table 10. This could be explained by a higher content of available magnesium in the soil on the average : 1 mg/100 g of soil in the NPK treatment, 2 mg in the NPK + Ca_1 treatment, and 2.8 mg in the NPK + Ca_2 one and slightly higher content of available phosphorus in the NPK + Ca_1 and NPK + Ca_2 soils.

The nitrogen effect on a soil unmanured with nitrogen for 45 years

The previous soil studies (1962) showed that a soil non fertilized with nitrogen for 40 years contained similar quantities of available nitrogen to those of the soil fertilized with N every year. Thus, the study was limited to field experiments conducted with the purpose of measuring the effect of mineral nitrogen in the soil non fertilized with this element for a longer period of time, compared with the effect of annual nitrogen supply.

These experiments was conducted during four successive years on fields A V and A VII, and D V and D VI in such a way that CaPK plots received 60 kg N per hectare annualy. This object has symbol CaPK/N, whereas the object receiving nitrogen for a long time has symbol CaNPK. In the fifth year the CaPK/N soil did not receive nitrogen ; carry over of nitrogen applied during previous four years was studied. The results are presented in table 11.

The yields obtained on soil fertilized with nitrogen after many years' elimination of this element equalled those obtained from soil regularly enriched with nitrogen since the first year of the experiment. With regard to nitrogen carry over observed in the fifth year, yields on CaPK/N plots were always somewhat higher than those on CaPK, the non fertilized with nitrogen at all. However, these differences are not significant. It is possible that nitrogen carry-over effect would be more pronounced if doses of nitrogen were higher than 60 kg N per hectare, and nitrogen application extended over four years. This seems to be indicated by soil nitrogen content (total amount of nitrogen, and its available forms). Soils nitrogen contents are given in table 12.

The phosphorus effect in soils non P-fertilized since 45 years

The effect of available phosphorus on permanent experimentation soils is very low on soils non fertilized with phosphorus since 1923 (combination NK or CaNK). The phosphorus content ranges between 2.7 to 4.2 mg P_2O_5 p. 100 g soil (Egner-Riehm method).

TABLE II

Crop yields, in quintal per hectare, on soil regularly fertilized with nitrogen and on soil non N-fertilized for 45 years

Field	Treatment	Years				
		1	2	3	4	5 carry-over effect only
		rye	potato	winter wheat	rye	potatoes
A V	CaNPK	40.7	162.5	34.3	37.6	260.0
	CaPK	18.7	105.2	16.4	18.0	142.8
	CaPK/N/	—	194.8	35.2	33.6	158.8
	LSD	3.90	31.3	2.85	3.67	25.7
		winter wheat	rye	potatoes	winter wheat	rye
A VII	CaNPK	35.1	29.7	106.9	26.4	35.2
	CaPK	18.5	10.8	57.2	10.4	16.4
	CaPK/N/	—	30.0	119.2	26.4	17.6
	LSD	4.63	3.24	13.9	3.20	3.10
		winter wheat				potatoes
D V	CaNPK	39.0	20.5	26.4	15.9	248.2
	CaPK	28.8	12.5	10.0	7.1	185.2
	CaPK/N/	38.9	21.1	26.2	12.4	200.9
	LSD	4.99	2.61	2.13	1.95	32.7
		rye				
D VI	CaNPK	29.9	22.4	19.3	26.7	25.7
	CaPK	14.4	10.1	9.0	13.3	14.7
	CaPK/N/	31.2	22.1	19.0	25.7	15.2
	LSD	3.36	2.80	1.65	2.20	2.50

In the investigations on the recovery of full productivity on soils exhausted of available phosphorus a different approach was accepted than in the case of nitrogen. Two levels of phosphorus application were accepted :

a) in the first two years, 96 kg P_2O_5 per hectare doses were applied, in the third and fourth year the doses were 48 kg P_2O_5 per hectare. A total of 288 kg P_2O_5 was applied during four years ; in the fifth year phosphorus carry-over was studied. This fertilizer object will have symbol P_2.

b) In the first two years 192 kg P_2O_5 per hectare doses were applied and in the third and fourth year, 48 kg P_2O_5 (symbol P_4). The form of phosphorus has always been ordinary superphosphate (18 p. 100). The yields of plants cultivated during 5 years are presented in table 13.

The effect of phosphorus in soil strongly depleted of this element (object CaNK) is especially high on field D VI (monoculture of rye) ; it is so already in the first year after the application of a high phosphorus dose. Potatoes, in other fields, showed

TABLE 12

Soil nitrogen content in relation to the period of fertilization

Field	Treatment	(in mg N in 100 g of soil)					
		after 1 year of N application on CaPK/N/treatment			after 4 years of N application on CaPKN/treatment		
		Total N	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	Total N	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$
A	CaNPK /N since 1923/	85	1,0	0,7	82	2.2	1.1
	CaPK	79	0.8	0.7	80	1.5	0.9
	CaPK/N/	—	—	—	80	2.0	0.9
D V	CaNPK /since 1923/	83	0.9	0.8	82	2.2	1.1
	CaPK	80	0.6	0.8	80	1.5	0.9
	CaPK/N/	—	—	—	80	2.0	0.9
D VI	CaNPK /since 1923/	95	1.2	1.0	88	2.3	1.4
	CaPK	90	1.0	0.7	84	1.7	1.0
	CaPK/N/	—	—	—	85	1.9	1.2

relatively poor response to the addition of phosphorus to soils strongly depleted of this element.

In the second and third year of the application of high phosphorus doses (object CaNK — P_4), the yields of wheat on field D V did not reach the level of those obtained on soil yearly fertilized with phosphorus (object CaNPK).

With regard to phosphorus content in plant material, its content in seeds was markedly lower in plants from CaNPK treatments. This concerns mainly wheat. Still greater differences occurred in phosphorus content in straw. However, no « luxury » uptake was found in the cases where high doses of phosphorus were applied ($CaNKP_4$). Higher phosphorus doses did not essentially influence the content of other nutrients, *e.g.* manganese, iron and zinc.

The available phosphorus in soil non fertilized since 1923 with this element (object CaNK) is low, deviating between 2.7 to 4.2 mg per 100 g of soil ; the soil regularly enriched with phosphorus contains about 12 mg of available phosphorus. Determinations of available phosphorus, in the studies on the recovery of depleted soils, were made each year after harvesting. The data obtained are presented in table 14.

Already in the first year after the application of a high phosphorus dose (P_4) on soil depleted of this element the amount of available phosphorus in soil markedly increased ; 192 kg P_2O_5 per hectare was applied, which corresponds to about 6.5 mg P_2O_5 per 1 g of soil. A similar dose applied in the following year caused only a slight increase of phosphorus content (Field D V and D VI), or did not have any effect at all (Field A). A total of 384 kg/ha P_2O_5 was applied in the first two years, which corresponds to about 13 mg P_2O_5 per 100 g of soil. Thus, it can be assumed that about

TABLE 13

Crop yields, in quintal per hectare, in relation to phosphorus fertilization

Field	Fertilizer object	Years				
		1	2	3	4	5 carry-over effect
		rye	potatoes	winter wheat	rye	potatoes
A V	CaNPK	40.7	162.5	34.3	37.6	260.0
	CaNK	36.4	165.2	30.8	30.8	241.2
	CaNK/P_2/	40.4	175.2	35.6	34.0	228.0
	CaNK/P_4/	41.2	179.2	34.8	34.0	188.0
	LSD	3.90	31.3	2.85	3.67	25.7
		winter wheat	rye (grains)	potatoes	winter wheat (grains)	rye (grains)
A VII	CaNPK	35.1	29.7	106.9	26.4	35.2
	CaNK	34.8	26.4	85.2	21.2	31.2
	CaNK/P_2/	33.2	28.4	92.0	25.2	32.4
	CaNK/P_4/	34.8	29.4	124.8	27.6	29.6
	LSD	4.68	3.24	13.9	3.20	3.10
		winter wheat (grains)				potatoes
D V	CaNPK	39.0	20.5	26.4	15.9	248.2
	CaNK	33.6	14.9	21.4	12.4	239.9
	CaNK/P_4/	37.0	16.3	22.2	15.7	248.9
	LSD	4.99	2.61	2.13	1.95	32.7
		rye				
D VI	CaNPK	29.9	22.4	19.3	26.7	25.7
	CaNK	26.4	11.0	7.1	19.5	20.0
	CaNK/P_4/	31.2	26.9	20.0	27.1	27.6
	LSD	3.36	2.80	1.65	2.20	2.50

50 p. 100 of phosphorus supplied remained during that time in an available form. In the third and fourth year only 48 kg P_2O_5 was applied each year ; under such conditions the increased content of the nutrient does not change, especially on fields A. However, in the fifth year when phosphorus was not applied on $CaNKP_2$ and $CaNKP_4$ treatments the level of available phosphorus markedly decreases, particularly in soils of fields D (*i.e.* monocultures). Available phosphorus level in CaNPK soils (*i.e.* soils fertilized with about 40 kg P_2O_5 per hectare since 1923) did not undergo any essential changes during the period of the discussed experiments.

The potassium effect on soil non fertilized with this element since 45 years

The available potassium content of the permanent experiments soils is exceptionally low on fields which have not been fertilized with potassium since 1923. This concerns CaNP plots ; the content of exchangeable potassium (extract in

TABLE 14

Soil available phosphorus content in relation to phosphorus fertilization
(in mg per 100 g)

Field	Treatment	Years				
		1	2	3	4	5
		after rye	after potatoes	after winter wheat	after rye	after potatoes
A V	CaNPK	12.9	12.3	11.6	12.0	11.7
	CaNK	3.9	2.7	3.0	1.4	2.0
	CaNK/P_2/	6.9	7.3	7.3	4.6	4.0
	CaNK/P_4/	10.0	8.0	9.7	8.2	7.0
		wheat	rye	after potatoes	winter wheat	rye
A VII	CaNPK	12.9	12.5	11.9	10.7	11.7
	CaNK	3.9	2.9	2.9	2.0	2.0
	CaNK/P_2/	6.9	7.9	5.9	5.9	4.0
	CaNK/P_4/	10.0	9.5	9.3	9.4	7.0
		after wheat		after potatoes		
D V	CaNPK	12.5	12.3	12.6	9.5	9.8
	CaNK	4.2	2.7	3.0	2.1	1.6
	CaNK/P_4/	9.6	10.8	10.2	8.2	5.1
		after rye				
D VI	CaNPK	11.6	12.3	10.1	11.2	11.0
	CaNK	2.7	2.0	1.3	1.5	1.7
	CaNK/P_4/	7.0	9.4	8.3	8.0	4.0

NH_4OAc *N* pH 7,0 (deviates from 2.3 to 4.6 mg K_2O p. 100 g of soil. The level of exchangeable potassium is especially low in soil on field D V, *i.e.* potato monoculture (see table 16).

In the studies on the recovery of full productivity of soils strongly depleted of available potassium, the following tests were made :

On some CaNP plots, 144 kg K_2O/ha was applied in the first two years (on each plot) and in the third and fourth year, 72 kg each year. In this way, in the course of four years, a total of 432 kg K_2O per hectare was applied. In the fifth year, potassium taken up by the fertilized crops was studied and the soil did not receive any potassium, this year. This treatment has the symbol CaNP/K_2.

The remaining part of CaNP soil was treated in the first two years with 288 kg/ha K_2O each year; in the third and the fourth year 72 kg/ha K_2O was applied each year. In this way, a total of 720 kg/ha K_2O was applied in the course of four years. This treatment has the symbol CaNP/K_4 in the tables.

The yields obtained in result of the above fertilizing scheme are presented in table 15.

The highest response to soil potassium deficiency is shown by potatoes (see yields on CaNPK and CaNP treatments).

For cereals, this response is also significant, however yield differences are, in general, smaller than for potatoes.

TABLE 15

Crop yields in relation to potassium fertilization
(in quintal per hectare)

Field	Treatment	Years				
		1	2	3	4	5 carry-over effect
		rye	potatoes	wheat	rye	potatoes
A V	CaNPK	40.7	162.5	34.3	37.6	260.0
	CaNP	38.0	112.0	29.6	30.8	118.8
	CaNP/K_2/	40.4	160.8	34.8	33.6	162.4
	CaNP/K_4/	40.4	204.8	34.0	34.0	190.8
	LSD	3.90	31.2	2.85	3.67	25.7
		winter wheat	winter rye	potatoes	winter wheat	rye
A VII	CaNPK	35.1	29.7	106.9	26.4	35.2
	CaNP	30.4	24.8	65.2	22.0	27.6
	CaNP/K_2/	30.8	30.4	90.4	22.8	28.8
	CaNP/K_4/	31.6	30.0	128.0	27.2	29.2
	LSD	4.63	3.24	13.9	3.20	3.10
		winter wheat				potatoes
D V	CaNPK	39.0	20.5	26.4	15.9	248.2
	CaNP	38.4	16.5	21.4	11.9	165.2
	CaNP/K_4/	27.3	12.0	17.6	8.6	221.8
	LSD	4.99	2.61	2.13	1.95	32.7
			rye			
D VI	CaNPK	29.9	22.4	19.3	26.7	25.7
	CaNP	28.8	12.5	11.9	22.8	18.1
	CaNP/K_4/	25.9	23.0	20.0	25.7	26.6
	LSD	3.36	2.80	1.65	2.20	2.50

The addition of fairly high potassium doses (144 kg K_2O per hectare) and very high doses (288 kg) in the first and second year to the strongly K-depleted soil led to a marked increase of yields which generally reached the level of those obtained on regularly K-fertilized soil (CaNPK treatment).

The yields of wheat from field D V (*i.e.* wheat cultivated for four years after 45 years' potato monoculture) are an exception here. In spite of a total of 720 kg per hectare K_2O supplied in the course of four years, the yields not only did not reach

the level of those obtained on CaNPK treatments, but each year they were significantly lower than those obtained on CaNP treatments, (*i.e.* on soil non fertilized with potassium since 45 years). As no such phenomenon was observed on rye monoculture (field D VI), and as Wheat did not react so unfavourably to strong potassium fertilization on the fields, it is difficult to offer a reliable explanation of this phenomenon. It should be noted here that the potatoes yield after four years of wheat crops was not significantly lower on CaNP/K_4 than on CaNPK ; however the exchangeable potassium decreased from 13 mg K_2O per 100 g of soil to 4.5 mg (see table 16).

TABLE 16

Soil exchangeable potassium content in relation to K fertilization
(in mg/100 g of soil)

Field	Treatments	Years				
		1	2	3	4	5
A V	CaNPK	12.1	12.0	12.3	10.3	10.1
	CaNP	4.0	4.3	4.9	4.0	4.6
	CaNP/K_2/	6.2	8.3	7.4	6.8	4.8
	CaNP/K_4/	10.1	11.0	10.5	9.6	6.9
A VII	CaNPK	12.9	12.8	11.7	10.4	10.1
	CaNP	3.9	4.6	4.2	3.9	4.6
	CaNP/K_2 /	6.9	8.5	6.7	7.4	4.8
	CaNP/K_4/	10.0	10.7	8.7	8.1	6.9
D V	CaNPK	11.5	10.6	10.4	10.6	10.9
	CaNP	3.1	2.3	3.7	3.4	2.9
	CaNP/K_4/	9.5	12.8	11.1	9.4	4.5
D VI	CaNPK	13.7	12.0	11.5	10.3	11.2
	CaNP	3.8	3.0	3.2	3.2	3.0
	CaNP/K_4/	9.2	10.7	10.7	9.1	6.0

At such intensive potassium fertilization in the first two years, an analysis of plant material showed luxury potassium uptake. Remarkably higher potassium content was found of course in straw, however with very high doses only (*i.e.* after 228 kg K_2O each year) and, in general, only in the first two years.

Taking into consideration the fact that the so called luxury potassium uptake was relatively poorly manifested, and that CaNP/K_2/ and CaNP/K_4/ did not always reach the level of those obtained in CaNPK treatment (this particularly concerns yields on field D V) it can be concluded that the utilization of high potassium doses applied to recover full productivity of K-depleted soils was poor. The utilization of a total dose of 360 kg K_2O ($CaNPK_2$ treatments) was 25.9 p. 100 on field A V, and 18.1 p. 100 on field A VII in the course of five years. The recovery of a total dose of 720 kg per hectare K_2O during the same period of time was 11.5 p. 100 on field D V to 32.8 p. 100 (field A V).

Large amount of supplied potassium must have been fixed in non exchangeable form. The data illustrating exchangeable potassium content in soil seem to substantiate the above assumptions. These data are presented in table 16.

Exchangeable potassium content in soil yearly fertilized with a dose of 72 kg per hectare K_2O (CaNPK treatment) remained on fairly equal level, not very high, on all four fields. The addition of very high doses caused, at first, marked increase of exchangeable potassium content ; however, in the fifth year, when potassium was not applied, this level markedly decreased ; especially where cumulative doses amounted to 360 kg/ha K_2O, the soil K content did not differ significantly from the CaNP treatment one (*i.e.* not fertilized since 1923). Fixation of a nutrient element introduced with a fertilizer to soils strongly depleted of that element into non exchangeable or unavailable forms was more pronounced for potassium than for P (see tables 14 and 16).

The application of high potassium doses to K-depleted soils (treatment CaNP) brought about changes in calcium and magnesium content in plants cultivated under such conditions. The calcium level decreased first of all in straw, whereas magnesium content dropped both in straw and in grains. Antagonistic effect of potassium on magnesium uptake was not clearly manifested in the case of potatoes.

Poor or, at times, negative effect of high potassium doses in field conditions on strongly K-depleted soils led the authors to try to explain this observation with pot experiments ; increasing potassium doses were accompanied by respective magnesium doses. Similar experiment was carried with other plants. In general, addition of magnesium positively influenced yields, although not within a range that would explain poor effect of potassium. Various nitrogen forms — ammonium nitrate, sodium nitrate and urea — were also tested in the studies.

Legume yields on soils where leguminous plants were not cultivated for 45 years

The studies on the recovery of full productivity in soils included also the response of legumes after 45 years without legumes. The yields of lucerne, red clover, peas and yellow lupine grown on soils from potato monoculture (field D V) were compared to those from A IX-XI fields, where legumes were grown for four years. Physical and chemical properties of both soils are similar, and it had to be assumed that the number of *Rhizobium bacteria* and their activity in potato monoculture soil should be smaller. A possibility cannot be excluded that by means of farming tools or by some other means a number of *Rhizobium bacteria* may have found way to the monoculture soil, although no legumes were cultivated on this soil for very long.

For technical reasons the experiments were carried out in pots. The soils examined received phosphorus, potassium and magnesium fertilizers and some pots mineral nitrogen in the amount of 30 p.p.m.N. These experiments were conducted for three years.

The greatest differences were found in lucerne yields : the yield on the soil where legumes were grown every four years was about 86 p. 100 higher than that on the potato monoculture soil. Mineral nitrogen added to the soil from monoculture raised lucerne yield by about 91 p. 100.

Differences in red clover and peas yields were markedly smaller, however

significant ; whereas yields of yellow lupin (seeds and straw) were the same on both soils, and no effect of mineral nitrogen was found.

To sum up the results of studies on the recovery of full productivity in soils depleted of one of the three basic nutrient elements : nitrogen, phosphorus and potassium, it should be emphasized that the addition of adequate amounts of nitrogen or phosphorus to the soil led to an increase of plant yields to the level of those obtained on regularly fertilized soils ; nitrogen and phosphorus content in plants was accordingly pertinent. The soil content of available phosphorus remarkably increased. In the case of potassium, further studies are necessary ; they would aim to answer the question of little or sometimes even detrimental effect of high potassium doses and of strong fixation of potassium in nonexchangeable forms.

It seems justified to give a closer consideration to a high synergy of manure and mineral fertilizing under the conditions of the Experimental Field at Skierniewice. Manure effect is relatively poor when compared with the mineral fertilizer one where markedly smaller amounts of NPK were applied, both on rye (table 2) and partly on potatoes (table 3). On the other hand, on fields E where manure + mineral fertilizers are applying together to potatoes, yields are markedly higher than on fields A where only mineral fertilizers are used. Marked residual effect of manure in fields E should also be emphasized : Barley growing as second crop after manure supply on fields without mineral fertilizers (Ca treatment) produces yields twice as high as those on fields A (table 5).

Reçu pour publication en mai 1976.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 643-657.

EFFECT OF LONG-TERM POTASSIUM FERTILIZATION ON CROPS AND POTASSIUM DYNAMICS OF A BROWN EARTH (WEIHENSTEPHAN)

Prof. Dr. A. AMBERGER and Dr. R. GUTSER

Lehrstuhl für Pflanzenernährung der TU München,
805 Freising-Weihenstephan,
West Germany

SUMMARY

In a 60 years trial different potash fertilizers (KCl with 40 resp. 50 p. 100 K_2O, K_2SO_4 and kainite) were proved for yields and potassium uptake of different crops as well as for effects on K dynamics of a brown earth (pH 6.3) with 1.6 p. 100 total K.

Between the + K and — K plots, there was a difference of about 1 000 dt/ha in total dry matter production and of 2 500-3 000 kg K/ha in potassium uptake. The utilization rate of the different K-forms was 44-50 p. 100, the best results gave the highly concentrated chloride forms, the lowest kainite. The potassium content of the plants was increased significantly by potash fertilization (especially in vegetative organs).

The response of crops on K fertilization was the highest for potatoes (60-80 p. 100 increase) and the lowest for wheat and barley (10-14 p. 100 increase). The total annual K uptake of different crops ranged between 60 (barley) and 270 (sugar beets) kg K/ha.

The quality of crop products was improved in all cases. The pH of the soil did not change after 60 years K fertilization.

CAL- and DL-extracts differentiated fairly well between — K and + K plots ; however even after this long fertilization period the CAL-resp. DL- level did not exceed 10 mg K_2O/100g soil nor expressed the high K removal of the soil K from the controls.

The total exchange capacity of the soil was decreased by long-term kainite application ; the sodium sorption increased extremly in the whole profil by this way. The potassium sorption was nearly the same in the + K and — K plots ; Ca and Mg were definetly higher in the controls.

In 1913 a potassium fertilizer trial was started on our experimental station at Weihenstephan (near Munich), which now belongs to the eldest trials of this kind in Germany. The experimental plan remained unchanged since that time and took the aim at the following question :

Effect of long-term potassium fertilization on yields, quality and potassium uptake of different crops as well as on potassium dynamics of a brown earth (Weihenstephan).

LOCATION

Climate

Weihenstephan lies 467 m on sea level at the edge of tertiary hill land. It exhibits 1 840 hours of sunshine yearly and an average air temperature of 7.7°C ; in July the temperature reaches about 17°C (fig. 1). The average sum of rainfall comes up to 800 mm/year with a steep peak in July.

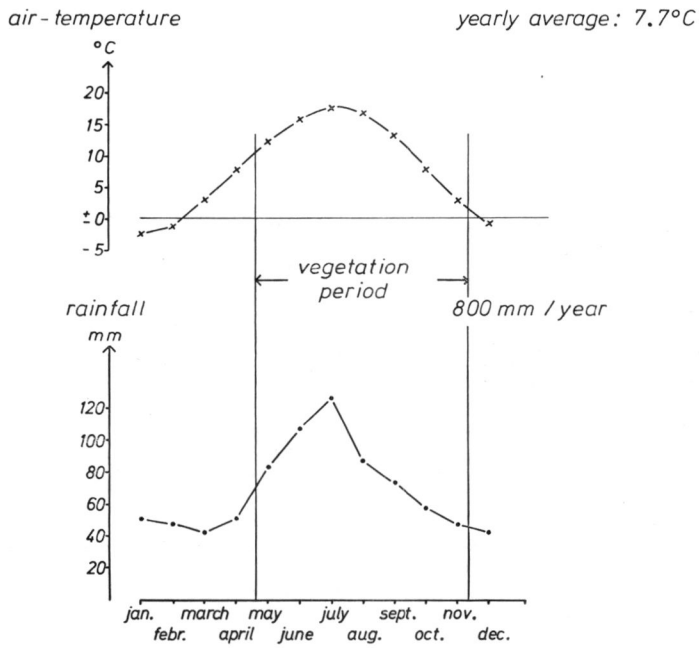


FIG. 1.

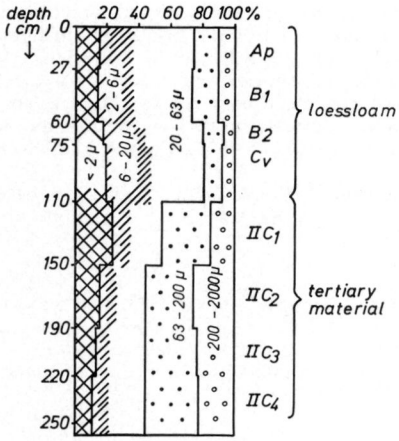
Soil

Physical data (fig. 2).

The soil may be classified as loess-loam above tertiary material (clayey sands to sands). The top soil consists of 20 p. 100 clay (< 2 μ), further 20 p. 100 correspond with fine silt (6-20 μ) ; about 30 p. 100 are particles between 20 and 63 μ diameter (coarse silt), the rest is fine respectively coarse sand. According to the distribution of the different particles in the top soil, this type

Physical data of the soil

Caractères physiques du sol



soil texture	porosity volume %	effect. field capacity mm
uL	42	32
sU	36	30
uL	34	14
uL	34	32
sL	36	52
sL	—	Σ 160
lS	—	
lS	—	

FIG. 2.

TABLE I

Chemical data of the soil

Caractères chimiques du sol

depth (cm)	pH ($CaCl_2$)	C %	N %	total K (mg / 100g soil)	K_2O CAL*) (mg / 100g soil)	total P (mg / 100g soil)	P_2O_5 CAL*) (mg / 100g soil)	P_2O_5 DL**) (mg / 100g soil)	Mg ($CaCl_2$) (mg / 100g soil)	TEC°) (meq / 100g soil)	CEC°°) (meq / 100g soil)	Na (meq / 100g soil)	K (meq / 100g soil)	Ca (meq / 100g soil)	Mg (meq / 100g soil)	base sat. %
0 – 27	6.7	0.81	0.10	1.54	10	83.3	20	36	10	12.0	11.7	0.03	0.18	10.6	0.89	98
27 – 60	6.7	0.38	0.06	1.55	7	56.7	4	7	10	10.7	10.5	0.01	0.10	9.4	0.95	98
60 – 75	6.8	0.31	0.05	1.66	7	54.9	3	5	15	11.9	11.0	0.01	0.14	9.3	1.55	92
75 – 110	6.3	0.36	0.06	1.67	8	62.3	4	4	25	11.9	9.9	Sp	0.15	7.4	2.30	83
110 – 150	6.1	—	—	1.60	8	48.8	3	3	31	14.7	12.3	0.01	0.18	9.0	3.16	84
150 – 190	6.1	—	—	1.53	7	43.6	2	2	27	11.8	10.1	0.01	0.14	7.4	2.56	86
190 – 220	6.0	—	—	1.57	7	36.6	3	3	25	13.0	9.4	n.n.	0.12	6.9	2.36	72
220 – 250	6.1	—	—	1.61	7	39.7	3	3	25	11.4	9.4	0.02	0.12	6.9	2.39	82

°) TEC = total exchange capacity
°°) CEC = cation exchange capacity

*) CAL = calcium acetate lactate
**) DL = double lactate

of soil can be characterized as silty loam with a porosity volume of 42 p. 100 (in the upper horizon) respectively 35 p. 100 (in deeper zones) and an effective field capacity of 160 mm in the profil down to 150 cm depth (HARTGE, 1971).

Chemical data (table 1).

The pH-value ($CaCl_2$ extract) in the upper soil is about 6.7 ; the total-C content decreases from 0.81 p. 100 in the top soil to 0.36 p. 100 (between 75-110 cm depth).

The total potassium is roughly 1.5-1.7 p. 100 in the loess as well as in the tertiary material ; about 0.5 p. 100 from that is CAL-extractable (SCHÜLLER, 1969) with an evident increase in the top soil as a consequence of long term K fertilization. The total P content is moderate, in lower zones very poor ; the CAL-respectively DL-values are again highly improved by P fertilization. The $CaCl_2$ extractable magnesium is high and increases in deeper zones.

On total exchange capacity (TCE) Ca shares with about 90 p. 100 and Mg with about 7 p. 100. In lower zones the Ca-sorption decreases to approximately 70 p. 100 but Mg increases to about 20 p. 100. Compared with these the potassium ranges only between 1.5 p. 100 (top soil) and 1 p. 100 (in the tertiary material).

All the methods not especially quoted are from « *Handbuch d. Landw. Versuchs- u. Untersuchungsmethodik*, 1955 ».

Field trial

This long term experiment was layed out 1913 according to the following plan (table 2) and represents a comparison between different potash fertilizers on the base of an normal nitrogen and phosphorus fertilization. According to the percentage of secondary constituents, very different amounts of chloride, sulfate, magnesium and sodium have been applied since more than 60 years (table 3).

TABLE 2

Experiment plan and nutrient content of potash fertilizers

Plan d'essai et teneur en éléments nutritifs des engrais potassiques

begin:	1913/14						
trial plan:	K_0						
	kainite						
	KCl (40% K_2O)						
	KCl (50% K_2O)						
	K_2SO_4						
parallels:	at beginning	6 à 25 m^2					
	later on	3 à 25 m^2					
liming (kg CaO/ha):	1932	275	as	$CaCO_3$			
	1935	1200	as	$CaCO_3$			
	1944	700	as	$Ca(OH)_2$			

average nutrient content (%) of potash fertilizers				
K	Cl	SO_4	Mg	Na
10.4	43	15	4	22
33.2	43	9	2	8
41.8	45	4.5	1	4
41.1	0.5	54	0.5	0.1

(according to communications of Agricult. Chem. Station Stuttgart and our own investigations)

No manure was applied during the whole period.

Especially by continous kainite fertilization very high amounts of Cl and Na and amounts of SO_4 equal to K_2SO_4 have been applied.

The rotation corresponds fairly with a so called three-course system : root crops-cereals-cereals.

The most frequent crops and the average amounts of NPK applied per year are listed up in table 4.

TABLE 3

Applied amounts of secondary constituents from 1914-1975
kg/ha

K - form	Cl	SO_4	Mg	Na
kainite	22 300	7 800	2 100	11 400
KCl (40% K_2O)	7 000	1 500	330	1 300
KCl (50% K_2O)	5 800	600	130	500
K_2SO_4	70	7 100	70	10

TABLE 4

Cultivated crops and amounts of fertilization

Cultures et quantités en éléments fertilisants

cultivated crops 1914-1975	years	average annual fertilizer doses (kg/ha)		
		N	P	K
winter resp. summer wheat	11	56	28	66
winter rye	2	30	27	62
oats	3	60	32	72
winter resp. summer barley	13	36	24	63
potatoes	11	77	28	94
beets (fudder or sugar)	7	111	45	133
maize	3	83	35	108
legumes, rape, vegetable crops etc.	9	69	37	113

RESULTS

Dry matter production of crops (table 5)

In the NPK plots between 5 400 and 5 500 dt dry matter/ha have been produced after 59 crops compared with 4 500 dt/ha in the control. This is adequate to not much more than 90 dt dry matter/ha and year, respectively 76 dt/ha in the plots without K and to an average potash uptake between 115 and 126 respectively 77 kg K/ha and year.

TABLE 5

Total dry matter production and K - uptake 1914 - 1975 (59 crops)

Production en matière sèche totale et K absorption 1914 à 1975 (59 cultures)

K - form	yield dt dr. m./ha		uptake kg K/ha		fertilization kg K / ha		utilization rate of K-fertilization %	K - uptake — K - fertilization kg K/ha	
	Σ	yearly	Σ	yearly	Σ	yearly		Σ	yearly
K_0	4508	76.4	4531	76.8	–	–	–	4531	76.8
kainite	5381	91.2	6803	115.3	5127	86.9	44	1676	28.4
KCl (40% K_2O)	5517	93.5	7269	123.2	5127	86.9	53	2142	36.3
KCl (50% K_2O)	5511	93.4	7410	125.6	5127	86.9	56	2283	38.7
K_2SO_4	5399	91.5	7039	119.3	5127	86.9	49	1912	32.4
CD 5%	222	3.9	490	8.6					

TABLE 6

Mineral contents in plant material (% i. dry matter)

K - form	sugar beets							
	beets				leaves			
	K	Na	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg
K_0	0.91	0.10	0.16	0.16	2.81	1.91	1.32	0.70
kainite	0.93	0.14	0.14	0.15	3.43	3.51	0.95	0.45
KCl (40% K_2O)	0.98	0.09	0.15	0.16	3.73	3.15	1.03	0.52
KCl (50% K_2O)	0.96	0.06	0.14	0.15	3.57	2.22	1.20	0.62
K_2SO_4	0.94	0.06	0.15	0.15	3.66	1.74	1.11	0.50
CD 5%	0.10				0.32			

K - form	potatoes				cereals					
					grains			straw		
	K	Na	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg
K_0	1.73	0.02	0.06	0.09	0.50	0.07	0.13	0.75	0.35	0.08
kainite	2.24	0.03	0.05	0.08	0.52	0.07	0.12	1.07	0.26	0.07
KCl (40% K_2O)	2.35	0.01	0.05	0.09	0.52	0.06	0.12	1.14	0.28	0.07
KCl (50% K_2O)	2.79	0.01	0.05	0.09	0.53	0.06	0.12	1.16	0.28	0.07
K_2SO_4	2.42	0.01	0.05	0.11	0.54	0.07	0.13	1.10	0.30	0.07
CD 5%	0.38				0.08	0.02	0.005	0.08	0.02	0.002

The average annual fertilization rate of 86.9 kg K/ha was utilized by kainite only with 44 p. 100, by potassium sulfate resp. chlorides not higher than with 49-56 p. 100 because of a relatively high K delivery from the soil.

Within the whole period 4 531 kg K/ha were delivered from the soil reserve to crops without K fertilization. However in the NPK plots the total K uptake by plants ranged between 6 800 and 7 400 kg/ha and was covered by fertilizer K only to about 70 p. 100 ; consequently the rest, that means 28-40 mg K_2O/100 g soil (up to 45 cm depth) came from the soil.

As to the different fertilizer forms, both potassium chlorides obtained the highest dry matter production and K-uptake, whereas kainite and potassium sulfate showed more or less lower results. This good response of highly concentrated KCl-fertilizers may be a matter of the easy uptake of K^+ and Cl^- compared with SO_4^{--} ; however the high salt content of kainite (see table 2) deteriorated soil properties (see later) and depressed yields.

The *potassium content* (table 6) of plants well dressed with K is very low in grains (Ø 0.5 p. 100 i. dry matter) ; in beets and straw it ranges between 0.9 and 1.1 p. 100, but is very high in potato tubers (ca. 2.5 p. 100) and sugar beet leaves (ca. 3.6 p. 100). Plants suffering from K deficiency show much lower figures.

TABLE 7

Average yearly yields (dt dry matter/ha), K uptake (kg K/ha) and utilization of K (%)

Rendement moyen annuel (dt mat. sèche/ha), absorption (kg K/ha) et utilisation de K (%)

K-form	potatoes			sugar beets			maize		
	yield	K-uptake	K-utilization	yield	K-uptake	K-utilization	yield	K-uptake	K-utilization
	94 kg K/ha x)			133 kg K/ha x)			108 kg K/ha x)		
Ko	40.4	74	–	151.6	195	–	94.2	71	–
kainite	66.1	161	92	186.0	262	50	123.3	115	41
KCl (40% K_2O)	72.2	181	114	183.8	268	55	125.1	115	41
KCl (50% K_2O)	73.0	182	116	187.6	277	61	112.0	117	43
K_2SO_4	72.4	180	113	189.2	259	48	124.3	124	49
CD 5 %	6.6	23.5		12.6	24.5		21.3	35.0	
	wheat			barley			oats		
	yield	K-uptake	K-utilization	yield	K-uptake	K-utilization	yield	K-uptake	K-utilization
	66 kg K/ha x)			63 kg K/ha x)			72 kg K/ha x)		
Ko	92.6	57	–	66.8	42	–	75.8	78	–
kainite	100.8	79	34	75.4	61	31	74.5	90	17
KCl (40 % K_2O)	104.6	86	45	76.4	63	33	79.6	107	40
KCl (50 % K_2O)	106.6	89	49	75.6	63	33	79.7	109	43
K_2SO_4	104.4	82	38	72.2	57	23	80.9	109	43
CD 5 %	5.8	10.2		3.4	4.8		5.2	10.4	

x) = average yearly fertilization

The *sodium content* is very low in potatoes, but in sugar beet leaves it is nearly as high as potassium ; the sodium level is influenced by potash fertilizers on behalf of their different sodium content (see table 2).

Generally, the plants from the control plots show little higher *Ca and Mg contents* compared with those well supplied with potassium.

Response of crops on potash fertilization :

Among the main cultivated crops *potatoes* gave the maximum response on potash fertilization (table 7), that means an increase of about 64 p. 100 in case of kainite and even 80 p. 100 of all the other K fertilizers. Similar results are reported by KICK and POLETSCHNY (1975).

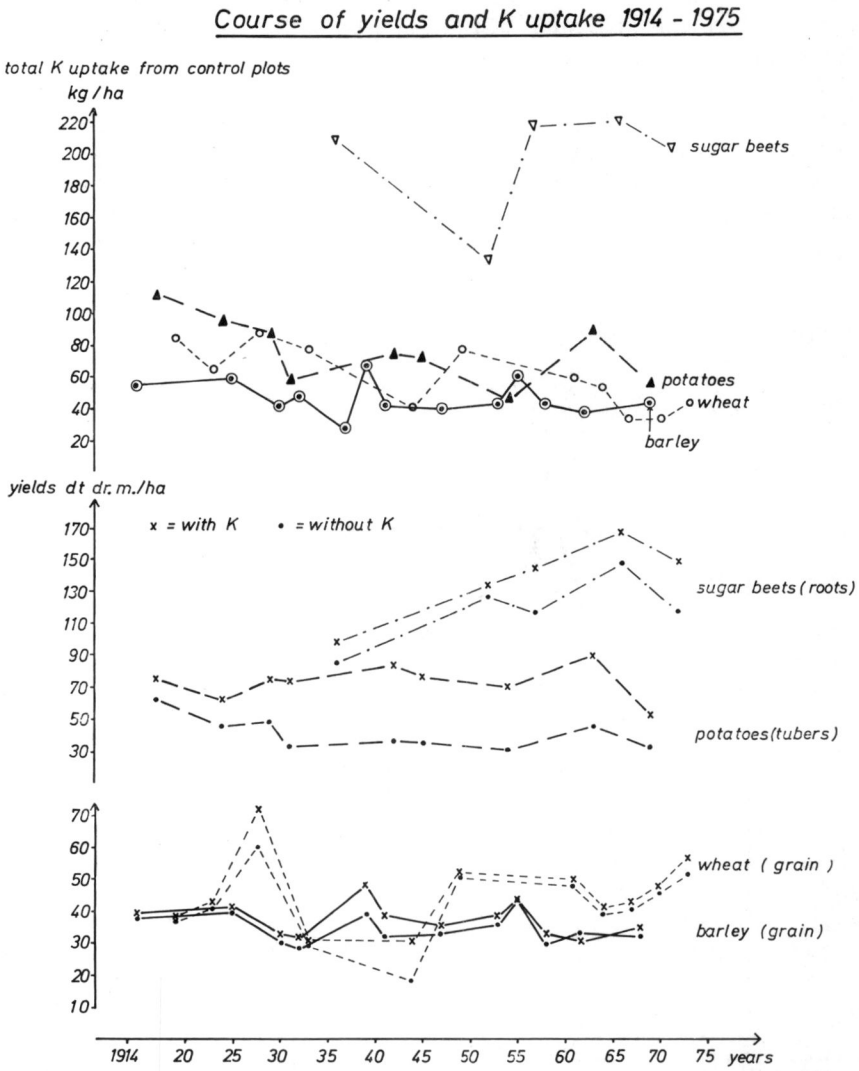


FIG. 3.

The average annual fertilization of 94 kg K/ha as highly concentrated forms has been utilized completely. Sugar *beets* dressed with potash, increased the yields by 23 p. 100 (without any marked difference between the K-forms) and utilized the mineral K at a rate of 48-61 p. 100 (at the best from the highly concentrated potassium chlorides, at the lowest from potassium sulfate).

Maize answered on mineral K fertilization with an increased dry matter production of about 30 p. 100, *wheat* and *barley* with 10-14 p. 100, whereas *oats* did not attend more than 5 p. 100, depending on the potash form in each case. The concentrated potash fertilizers have been utilized with 44 p. 100 by wheat, 42 p. 100 by oats and 30 p. 100 by barley. Kainite, nowadays a not very common K fertilizer reached always considerably lower results because of its high salt content.

The total K uptake from the usual chloride resp. sulfate forms ranged between 60 (barley) and 117 (maize) among the cereals and between 181 (potatoes) and 270 (sugar beets) kg K/ha and year among the dicots.

The question is now : how do run the yields and K uptake in + K and — K plots within 60 years?

According to figure 3 the highly K-intensive potatoes show slowly decreasing yields and potassium uptake in the controls ; obviously the soil potassium will run more slowly with time. The K uptake of wheat and barley is very similar however this slowly dropping removal of soil K does not affect the yields of these crops yet.

Among the dicots sugar beets show the highest ability of utilizing soil K (195 kg K/ha), oats (78 kg K/ha) and wheat (57 kg K/ha) surpass the other cereals.

Generally *the quality* of crop products was improved by potassium supply (table 8), that is for instance kernel weight and percentage of full kernels for wheat and barley, starch and sugar contents of potatoes resp. sugar beets. Consequently higher amounts of starch and sugar/ha were achieved.

TABLE 8

Quality of crop products as affected by potassium

Influence du potassium sur la qualité des cultures

K - form	wheat		barley		potatoes		sugar beets	
	thousand kernel weight g	percentage of kernels > 2.5mm ø	thousand kernel weight g	percentage of kernels > 2.5mm ø	starch % in fresh weight	starch dt/ha	sugar % in fresh weight	sugar dt/ha
K_0	34.9	83.5	42.6	90.0	17.0	32.2	19.9	112
kainite	41.0	90.2	43.4	92.0	16.3	53.8	20.3	124
KCl (40% K_2O)	42.0	89.2	43.6	92.2	17.5	60.7	20.4	127
KCl (50% K_2O)	41.6	90.5	43.4	92.1	17.5	61.2	20.2	123
K_2SO_4	41.4	91.0	42.9	92.7	18.0	64.3	20.2	122
CD 5%	1.1	4.0	0.7	1.3	4.2	4.2	0.7	7.0

Because of the high chloride content of kainite resp. potassium chlorides their permanent application depressed starch content and starch yields of potatoes evidently compared with the positive effect of the potassium sulfate.

Soil

The pH in the top soil, starting from approximately 6.0 was not affected at all by continuous potash application within 60 years (fig. 4). However several limings resulted in definite peaks, which subsequently slipped down to a more or less higher constant level.

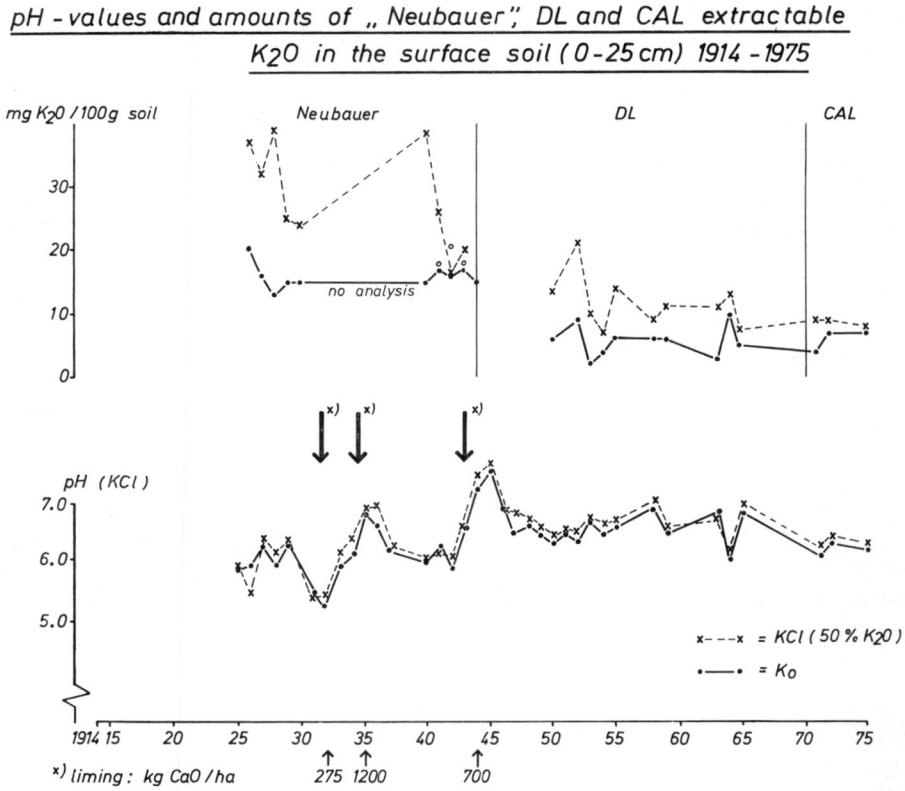


FIG. 4.

Potassium extractable by DL (= double lactate) respectively CAL (= calcium acetate lactate), differentiated fairly well between K_0 and KCl (50 p. 100 K_2O), however even after a normal potassium supply over 60 years the CAL values were not affected very much and did not exceed 10 mg K_2O/100 g soil finally. The control values remained nearly constant (6-7 mg DL-K_2O or about 16 mg Neubauer — K_2O/100 g soil) respecting the different methods for available K, inspite of an average yearly potassium removal of approximately 81 mg K_2O/100 g soil (see also SCHRÖDER, 1955).

Final investigations (autumn 1975) on K-dynamics in the soil profil (table 9) showed in the CAL-K and HCl-K minus CAL-K values (SCHACHTSCHABEL, 1961) only little differences between the — K and + K plots (independant from the K forms) in the whole profile, although very high K removals took place within the last 60 years.

TABLE 9

Effect of a long-term K - fertilization on CAL-K, HCl-K, K wet fixation and cation sorption

depth cm	K - form	total K %	CAL-K [x)]	HCl-K / CAL-K [xx)]	wet fixation	TEC [o)]	CEC [oo)]	Na	K	Ca	Mg	V [ooo)]
			mg K/100g soil			meq/100g soil						%
0-15	without K	1.59	6	26	22	14.2	13.7	0.02	0.14	12.4	1.14	96
	kainite	1.51	8	27	0	11.1	10.9	0.18	0.20	9.2	1.34	98
	K_2SO_4	1.55	7	30	8	11.8	11.1	0.08	0.15	10.1	0.81	94
15-30	without K	1.58	6	26	22	13.4	12.8	0.01	0.13	11.6	1.07	96
	kainite	1.53	5	18	22	10.5	10.5	0.49	0.08	8.7	1.27	100
	K_2SO_4	1.65	7	29	15	13.0	11.7	0.03	0.13	10.6	0.89	90
30-45	without K	1.56	7	29	23	13.2	11.3	0.03	0.16	9.1	1.99	85
	kainite	1.47	5	20	16	8.4	8.4	0.30	0.09	7.2	0.76	100
	K_2SO_4	1.66	7	25	31	12.0	11.1	0.02	0.12	10.0	0.99	93

x) = Calcium acetate lactate
xx) = soluble in 1n HCl

o) TCE = total exchange capacity
oo) CEC = cation exchange capacity
ooo) V = base saturation

Also the small numerical differences of total K are within the analytical error of these methods and do not allow further conclusions. However the wet fixation (SCHACHTSCHABEL, 1961) was very much lowered after a long-term supply with chloride or sulfate forms ; it even disappeared completely in case of kainite. The top soil of the K_0-plots maintained the same fixation capacity as the subsoil layers.

The *total exchange capacity* was the highest in the controls and decreased markedly by long-term kainite application. The K sorption on total exchange capacity was nearly the same both in the — K and + K plots and did not change practically in the whole profil. Ca and Mg sorption was definitely higher in the controls than in the concentrated K-form plots down to 45 cm depth regularly.

The sodium sorption was extremely raised by long-term kainite application and even increased in deeper layers, which demonstrates the high mobility of sodium in the profil. Also Mg sorption was elevated by kainite, consequently the base saturation increased up to 100 p. 100 of total exchange capacity.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The loess and tertiary material of this location is fairly rich of potassium (= 105 000 kg K/ha down to 45 cm depth). Obviously this K reserve can be mobilized relatively easily by the most plants, although the level of the available K remains low (7 mg CAL-K_2O/100 g soil).

The cultivated crops have specific potassium requirements and specific abilities for mobilizing soil K (cereals and sugar beets at the best, potatoes at the lowest).

A potassium balance in the soil (table 10 and table 5) after 60 years shows that in case of K_0 4 500 kg K/ha have been withdrawn from the soil reserve (that is 67 mg K/100 g soil down to 45 cm depth) and between 1 700 and 2 300 kg K/ha more from the plots supplied regularly with potash fertilizers (corresponding to 24-34 mg K/100 g soil in 45 cm depth).

TABLE 10

K balance 1914 - 1975

Bilan de K 1914 à 1975

K - form	K removal from soil 1914 - 1975			1975	
	kg K/ha	calc. to 45cm depth	difference to K_0	calc. to 45 cm depth CAL	K wet fixation
		mg K/100g soil			
K_0	4531	67	—	6	23
kainite	1676	24	43	6	13
KCl (50% K_2O)	2283	34	33	7	7
K_2SO_4	1912	28	39	7	11

However these very big differences in K uptake between — K and + K will hardly be expressed by CAL- or DL-values ; moreover the very small differences between — K and + K plots will not be enlarged even after 60 years K fertilization and confirm the results of v. BOGUSLAWSKI and LACH (1971) and RICHTER (1975). With regard to a clay content of 16 p. 100, obviously a K concentration of 0.35 mg CAL-K/g clay is typical for this loess location. It cannot be lowered permanently by plant uptake appart from changes within a vegetation period ; because of a fairly fast flow from native K to available K an equilibrium always stabilizes. Also ZEHLER (1959), SCHEFFER *et al.* (1960) resp. FEIGENBAUM and KAFKAFI (1972) come to similar conclusions. Obviously these methods are too rough to render differences like those in soil potassium adequate to a total removal of 81 mg K_2O/100 g soil in a depth of 45 cm within 60 years. This is not very much more than 1 mg K/100 g soil (calculated to 45 cm depth) or 76 kg/ha and year, which is delivered from native K by a permanent flow.

The best answer till gave the potassium wet fixation : after continuous potash supply it disappeared practically at all (see also WELTE and NIEDERBUDDE, 1965).

The difference between — K and + K are 10-16 mg K/100 g soil (to 45 cm depth) respect. 700-1 100 kg K/ha. Both, the positive difference in CAL-K and the decreasing fixation capacity by K fertilization makes up approximately 1 100 kg K/ha

all in all. However this is adequate only to about 1/3 of the calculated removal from plants well dressed with K or 1 p. 100 of total K of 45 cm top soil respectively 0.01 p. 100 K in the soil. However this difference lies within the margin of the analytical and sampling error over such a long period.

Consequently, all the chemical methods used here are not appropriate enough to explain the results of this field trial and therefore cannot replace the plant experiment. Some more specific investigations are necessary to elucidate the K dynamics of this location.

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

EFFET D'UNE FERTILISATION POTASSIQUE DE LONGUE DURÉE SUR LES RÉCOLTES ET SUR LA DYNAMIQUE DU POTASSIUM DANS UN SOL BRUN (WEIHENSTEPHAN)

Dans un essai de longue durée (60 ans), on a examiné l'influence d'engrais potassiques (KCl à 40 et 50 p. 100 de K_2O, K_2SO_4 et kaïnite) sur les rendements et l'absorption du potassium par différentes cultures ainsi que sur la dynamique de K dans un sol brun, de pH 6,3, contenant 1,6 p. 100 K total.

Il y avait une différence d'environ 1 000 d t/ha dans la production totale de matière sèche et de 2 500 à 3 000 kg/ha dans l'absorption du potassium par les cultures, entre les parcelles — K et + K. Le degré d'utilisation des différents engrais potassiques variait de 40 à 50 p. 100, les meilleurs résultats ayant été obtenus avec le KCl sous la forme la plus concentrée et les plus faibles avec la kaïnite.

La teneur des plantes en potassium a été augmentée significativement par les engrais potassiques, particulièrement dans les organes végétatifs. Les pommes de terre réagissaient le plus fortement à la fertilisation potassique (augmentation de rendement de 60 à 80 p. 100) alors que le blé et l'orge présentaient la plus faible réaction (augmentation de rendement de 10 à 14 p. 100).

L'absorption totale annuelle du potassium par les différentes cultures se situaient entre 60 (pour l'orge) et 270 kg K/ha (pour la betterave sucrière).

Dans tous les cas, la qualité des plantes a été améliorée.

On n'a pas constaté de changement dans le pH des sols après 60 ans de fertilisation potassique. Les sols des parcelles sans K et avec K ont été assez bien différenciées par les méthodes d'extraction DL (ou double lactate) et au CAL (calcium acétate lactate) ; mais après cette longue période de fertilisation, les teneurs en CAL-K et DL-K étaient inférieures à 10 mg K_2O/100 g de sol et ne rendaient pas compte de l'importante libération du K du sol par les témoins.

Après application prolongée de kaïnite, on pouvait observer une diminution de la capacité d'échange du sol ainsi qu'une forte augmentation du sodium échangeable dans toutes les couches du sol. Quant aux taux de K échangeable des sols des parcelles avec K et sans K, ils étaient semblables mais les teneurs en Ca et Mg échangeable des témoins étaient plus élevées.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG EINER LANGJÄHRIGENKALIDUNGUNG AUF ERNTEERZEUGNISSE UND KALIUMDYNAMIK EINER BRAUNERDE (WEIHENSTEPHAN)

In einem Dauerdüngungsversuch (60 Jahre) wurde der Einfluss verschiedener Kalidünger (KCL mit 40 p. 100 und 50 p. 100 K O, K SO und Kainit) auf die Ernteerträge und die Kaliumaufnahme durch verschiedenen Kulturen, sowie die Kaliumdynamik in einer Braunerde (Gesamt-Kalium 1,6 p. 100, pH 6,3) studiert.

Ein Unterschied von ungefähr 1 000 dt/ha in der gesamten Trocken — substanzerzeugung und von 2 500-3 000 kg/ha in der Kaliumaufnahme durch die Kulturen liess sich zwischen de — K und + K Parzellen feststellen. Die einzelnen Kalidüngesalze wurden zu etwa 40-50 p. 100 ausgenützt, wobei die besten Ergebnisse mit KCL Dünger und die schwächsten mit Kainit erhalten worden waren.

Die Anwendung von Kalidüngern führte zu einer erheblichen Erhöhung des Kaliumgehaltes der Planzen, besonders in den grünen Organen. Die Wirkung der Kalidünger war bei Kartoffeln am höchsten (60-80 p. 100 Ertragserhöhung), bei Weisen und Gerste am niedrigsten (10-14 p. 100 Ertragserhöhung).

Die jährliche Gesamtaufnahme an Kalium durch die verschiedenen Kulturen erreichte 60 (Gerste) bis 270 (Zuckerrübe) kg K/ha.

In allen Fällen konnte man eine Verbesserung der Qualität der planzlichen Produkte beobachten.

Keine Veränderungen der pH-Zahl der Böden konnten nach 60 jähriger Kalidüngung festgestellt werden. Durch die Extraktionsmethoden DL (Doppellaktat) und CAL (Calcium-Azetat-Laktat) wurden die Böden der Parzellen mit K und ohne K gut abgegrenzt ; aber die Gehalte an CAL-K und DL-K erreichten nicht 10 mg K 0/100 g Böden nach dieser Dauerdüngung und konnten auch den erheblichen K-Entzug aus dem Böden der Kontrolle nicht darstellen.

Nach langjährigem Einsatz von Kainit war eine Verringerung der Gesamtauschkapazität, sowie eine beachtliche Erhöhung des in allen Bodenschichten adsorbierten Natriums festzustellen. Beide Parzellen (mit oder ohne K) zeigten ähnliche Gehalte an austauschbarem K, doch waren die Gehalte an austauschbarem Ca und Mg in den Kontrollen höher.

РЕЗЮМЕ

Влияние длительного применения калийных удобрений на урожаи, и на динамику калия в коричневой почве (Вейгенстефан).

А. АМБЕРГЕР, Р. ГУТСЕР.

Влияние калийных удобрений (KCl содержавшего 50 % K_2O, K_2SO_4 и каинита) на урожайность, поглощение калия разными культурами, и динамику калия в коричневой почве (pH — 6,3), содержащей 1,6 % общего калия, изучалось в долгосрочном опыте (60 лет) :

— В общей продукции сухого вещества отмечена разница в приблизительно 1 000 тонн/га и в поглощении калия культурами — разница в 2 000 — 3 000 кг/га между делянками — K и + K. Степень потребления разных калийных удобрений изменялась от 40 до 50 % и наилучшие результаты получены были при применении наиболее концентрированных форм KCl, а результаты самые слабые — при применении каинита.

— Применение калийных удобрений увеличивало содержание элемента в растениях и особенно в их вегетативных органах. Картофель реагировал сильнее других культур на внесение калия (увеличени урожая на 60 — 80 %), в то время как реакция пшеницы и ячменя была наиболее слабой (увеличение урожая на 10 — 14 %). Суммарное поглощение калия разными культурами за год изменялось от 60 (ячмень), до 270 кг/га (сахарная свекла). Во всех случаях качество растений улучшалось.

— После 60-ти летнего внесений калийных удобрений не отмечалось никакого измения pH почвы. Для экстракций из почв делянок — K и + K применялись 2 разных метода: DL (двойной лактат)

и CAL (кальций, ацетат, лактат); но по истечении длительного периода внесения удобрений содержание K-CAL и K-DL не достигало 10 мг K_2 0/100 гр. почвы и делянки эти не освобождали те крупные количества почвенного калия какие освобождались контрольными делянками.

После длительного применения каинита наблюдались ослабление обменной способности почвы и сильное увеличение поглощения натрия во всех слоях почвы. Что-же касается процента обменного калия, он был одинаков в почвах делянок — K и + K, но контрольные делянки содержали больше Ca и Mg.

REFERENCES

BOGUSLAWSKI E. von, LACH G., 1971. Die K-Nachlieferung des Bodens im Pflanzenexperiment im Vergleich mit dem austauschbaren Kalium. *Z. Acker- und Pflanzenbau*, **134**, 135-164.

FEIGENBAUM S., KAFKAFI U., 1972. The effect of illite content in soils on the potassium supply to plants. *9th IPI-Colloquium : Potassium in soil.* Landshut, Germany, July 11th to 13th.

HANDBUCH DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN VERSUCHS- UND UNTERSUCHUNGSMETHODIK, 1955. Band I : *Die Untersuchung von Böden — Neumann Verlag*, Radebeul und Berlin, 3. Auflage.

HARTGE K. H., 1971. *Die physikalische Untersuchung von Böden.* Ferd. Enke Verlag, Stuttgart.

KICK H., POLETSCHNY H., 1975. Kaliumhaushalt und Ertragsleistung bei einem langjährigen Kaliformenversuch. *Landw. Forschung*, **31**/1.Sh. 59-68.

RICHTER D., 1975. Probleme der Charakterisierung des pflanzenverfügbaren Kaliums in Ackerböden. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau und Bodenkunde*, Berlin, **19**, 475-485.

SCHACHTSCHABEL P., 1961. Fixierung und Nachlieferung von Kalium- und Ammonium-Ionen — Beurteilung und Bestimmung des Kalium-Versorgungsgrades von Böden. *Landw. Forsch.*, **14**, 15.Sh, 29-47.

SCHEFFER F., WELTE E., GRAF v. REICHENBACH H., 1960. Über den Kaliumhaushalt und Mineral, bestand des Göttinger E-Feldes. *Z. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, **88**, 115-128.

SCHROEDER D., 1955. Kaliumfestlegung und Kaliumnachlieferung von Lössböden. *Landw. Forschung*- **8**, 1-7.

SCHÜLLER H., 1969. Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. *Z. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, **123**, 48-63.

WELTE E., NIEDERBUDDE E. A., 1965. Fixation and availability of potassium in loess derived and alluvial soils. *J. Soil Sci.*, **16**, 116-120.

ZEHLER E., 1959. *Die Kalium-Nachlieferung und Kaliumfixierung von Lössböden statischer Düngungsversuche.* Diss. T. H. Hannover.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 659-663.

CONTRIBUTION

THE EFFECT OF LONG-TERM FERTILIZATION UNDER DIFFERENT ECOLOGICAL CONDITIONS ON SPRING BARLEY AND RED CLOVER YIELDS

J. BAIER, F. KŘIŠŤAN, P. STRNAD and K. JELÍNEK [1]

Research Institute of Plant Production, Prague-Ruzyně, Czechoslovakia,
[1] *Research Institute of Agronomy, Hrušovany u Brna, Czechoslovakia*

SUMMARY

Long-term fertilization trials at three sites with different climatic and soil characteristics in which the use of fertilizers and farmyard manure was stopped permanently in the crop rotation showed that in a relatively short period of time (14-17 years) the yields of spring barley grain decreased almost by 60 p. 100 on brown soil and almost by 30 p. 100 on degraded chernozems.

The non supply of fertilizers was accountable for about 50 p. 100 of the over-all decrease of yields ; there was a trend of a higher effect of the lack of fertilizers in soils with a lower natural fertility.

Red clover grown as a subsequent crop showed its well-known remobilizing ability and did not show such a high response to the permanent disuse of fertilizers and manure. The greatest reduction of dry matter yield was observed on a heavily degraded chernozem soil (with a high K^+ fixation capacity) where the decrease reached ca. 25 p. 100. On the other tested sites (degraded chernozem and brown soil) the decrease was only about 10 p. 100.

Long-term fertilization trials were started in Czechoslovakia only in 1956-1957 on four to ten field model crop rotations, each field having 12 fertilization treatments with four replications (BAIER, 1963). The size of one plot is 8 × 8 or 10 × 10 m, the harvested areas are 25 m² (5 × 5 m).

The trials are performed under different soil and climatic conditions. The

purpose is to study a long-term effect of fertilization on the quantity and quality of yields and on soil fertility. Inorganic plant analyses serve for the study of the relations between fertilization, nutrient uptake, and nutrient utilization for the production of the crop (BAIER, 1968).

The effect of long-term fertilization under different ecological conditions is proved by the results from three sites which have not been treated with fertilizers since 1957 and with dung since 1961 within model crops rotations.

The first site, Pohořelice, is located in the altitude of 182 m above sea level on degraded chernozem on loess, loamy soil, in a arid climatic region.

The second site, Čáslav, lies at the altitude of 263 m, on highly degraded chernozem soil on loess, also on loam, in a slightly arid region. The soil of this site differs from the Pohořelice soil also in a higher K^+ cation fixation capacity.

The third site, Lukavec, is located at the highest altitude, 620 m above sea level, on brown soil on gneiss deluvium, sandy loam. This site belongs to a slightly humid climatic region.

Four fields of a model crop rotation are established at each of these sites. In the period from 1970 to 1973 two of these fields were always used for growing the following crops in succession : spring barley (*Diamant* variety) undersown with red clover (*Jičínský* variety) which became the main crop in the 1971-1974 years.

TABLE I

The effect of a long-term disuse of fertilizers on the yields of spring barley and the subsequent red clover

(full NPK fertilization = 100 p. 100)

	Degraded chernozem in arid region	Heavily degr. chernozem in slightly arid reg.	Brown soil in slightly humid region
Relative *spring barley* grain yield (without fertilizers for a period of 14-17 years)	86.7	86.5	65.7
Relative *red clover* dry matter yield in the case of the disuse of fertilizers for 15-18 years	96.0	85.6	104.7

The relations of average yields indicated in table 1 show that the yields of spring barley decreased at all the three sites as a result of the 14-15 years use of the soil without fertilization. This decrease reached the greatest extent on brown soil where it amounted to one third. On degraded chernozem soils, it is much smaller at both sites, reaching less than 1/7.

Hence the lack of fertilizers which had not been used for a long period of time affected the yields of spring barley ; on the other hand, the dry matter yields of red clover, grown as the subsequent crop, were not reduced so much. The wellknown

remobilizing ability of red clover made it possible that on the degraded chernozem soil the red clover dry matter yield was reduced only slightly (by 4 p. 100) and on the brown soil it was even slightly increased. The approximately 15 p. 100 decrease of the dry matter yield of red clover grown on highly degraded chernozem, corresponding to the relative decrease of the spring barley yields, can be ascribed to the high potassium fixation capacity of this soil,

Another considerable decrease of spring barley yields is shown on treatments without mineral fertilizers and dung since 1961 (table 2).

TABLE 2

The effect of a long-term disuse of fertilizers and manure on the yields of spring barley and the subsequent red clover

(full NPK fertilization = 100 p. 100)

	Degraded chernozem in arid region	Heavily degr. chernozem in slightly arid reg.	Brown soil in slightly humid region
Relative yield of *spring barley* grain in the case of a long-term disuse of fertilizers and manure within the crop rotation	72.4	73.3	41.1
Relative yield of *red clover* dry matter in the case of a long-term disuse of fertilizers and dung within the crop rotation	91.2	74.4	90.3

The disuse of organic manure gave the greatest yield depressing effect in the crop rotation on the brown soil whose natural fertility is lower than that of degraded chernozems. In comparison with the unmanused treatements (tabl. 1), the mentioned decrease of yields represents, in the given case, another decrease of the spring barley yields almost by 25 p. 100, whereas on degraded chernozem the decrease reaches only ca. 14 p. 100.

The yields of subsequent red clover were also affected by long-term disuse of dung in the crop rotation, although the mentioned effect was not so high on degraded chernozem (with a high K^+ fixation) : the dry matter yield of clover fell approximately to the level of the spring barley grain yield (ca. by 1/4) obtained in the absolutely unmanured treatment.

The over-all decrease reaches almost 60 p. 100 for spring barley in the combination supplied neither fertilizers nor farmyard manure in the brown soil and 30 p. 100 in the other cases. None mineral fertilizers supply shared in a greater proportion in the yield decrease on brown soil (58 p. 100) than on degraded chernozem soils (51 and 48 p. 100).

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

RÉSULTATS D'ESSAIS DE FUMURE DE LONGUE DURÉE EN DIFFÉRENTES CONDITIONS CULTURALES SUR LES RENDEMENTS DE L'ORGE DE PRINTEMPS ET DU TRÈFLE ROUGE

Les essais de fumure de longue durée effectués sur 3 localités différenciées au point de vue climat et sol et dans lesquelles on a éliminé, dans le cadre de la rotation donnée, l'application des engrais industriels et du fumier, montrent qu'après un temps relativement court (14 à 17 ans), on peut enregistrer sur les sols bruns un abaissement du rendement en grain de l'orge de printemps de 60 p. 100 et sur les chernozems dégradés de 30 p. 100.

L'abaissement total des rendements tenait pour 50 p. 100 à la non-application des engrais industriels tandis que ce pourcentage était encore plus élevé sur les sols à fertilité naturelle plus faible.

Le trèfle violet dont les effets de mobilisation des réserves du sol sont bien connues n'a pas réagi d'une manière aussi accentuée à la non-application de longue durée des engrais.

Le rendement en matière sèche a le plus diminué (à peu près de 25 p. 100) sur le chernozem très dégradé ayant une capacité de fixation pour K élevée, tandis que sur les deux autres localités (chernozem dégradé et sol brun) les rendements n'ont baissé que de 10 p. 100.

ZUSAMMENFASSUNG

ERGEBNISSE VON UNTER VERSCHIEDENEN KULTURBEDINGUNGEN VORGEFÜHRTEN LANGFRISTIGEN DÜNGUNGSVERSUCHEN AUF DIE ERTRÄGE VON SOMMERGERSTE UND ROTKLEE

Die in drei in Klima und Boden voneinander abweichenden Örter vorgeführten langfristigen Düngungsversuche, wo die Anwendung von mineralischen Düngern und Mist im Rahmen der gewählten Fruchtfolge beseitigt wurde, erwiesen dass nach einem relativ kurzen Zeitabschnitt (14 zu 17 Jahre) eine 60 p. 100 Senkung des Sommergerstekornertrags auf Braunerden und eine 30 p. 100 Senkung desselben auf die degradierten Tschernozeme verzeichnet sein konnte.

Die gesamte Ertragsverminderung war zu 50 p. 100 durch die Nichtanwendung von Mineraldüngern bedingt während dieser Prozentsatz auf die Böden mit verminderter natürlichen Fruchbarkeit noch höher ist.

Der Rotklee, dessen Wirkung von Mobilisierung der Bodenreserven gut bekannt ist, hat nicht auf die langfristige Nichtanwendung von Düngern so scharf zurückgewirkt.

Der Trockensubstanzertrag hat sich auf den, mit einer hohen (von ungefähr 25 p. 100) Fixierungskapazität für K sehr degradierte, Tschernozem am meisten herabgesetzt, während die Erträge auf die beiden anderen örter (degradierter Tschernozem und Braunerde) nur um 10 p. 100 sich herabgesetzt hatten.

РЕЗЮМЕ

Выступление. — Результаты долгосрочного опыта удобрения ярового ячменя и клевера лугового в разных условиях культуры.

Ж. БАЙЕР, Ф. КРЖИШТАН, П. СТРНАД, К. ИЕЛИНЕК.

Долгосрочные опыты удобрения проводившиеся в 3-х различных местностях, в разных климатических условиях и на разных почвах, при которых, в кадре данного севооборота не применялись ни промышленные

удобрения, ни навоз, показали что урожайность ярового ячменя падала на 60 % в коричневых почвах, и на 30 % в деградированных черноземах за сравнительно короткий срок (от 14-ти до 17-ти лет). 50 % общего падения урожайности можно отнести за счет отсутствия промышленных удобрений, и процент этот еще увеличивался в почвах по природе мало плодородных. Клевер, способность которого мобилизировать запасной азот почв хорошо известна, более слабо реагировал на долгое отутствие удобрений.

Процент сухой массы урожая уменьшился больше всего на сильно деградированном черноземе, закрепляющем крупные количества калия (приблизительно 25 %), в то время как на двух остальных (деградированный чернозем и коричневая почва) процент этот уменьшился только на 10 %.

REFERENCES

BAIER J., 1963. On the research of the effect of intensive rates of fertilizers in the Czechoslovak Socialist Republic. *Rostlinná výroba* (Praha), **9** (3-4), 271-286.

BAIER J., 1968. On the utilization of nutrients for photosynthetic production. *For. Soc. Agric. Sci.*, **1**, 1-14.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 665-700.

INTERVENTION

ESSAI DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE SUR SABLES LIMONEUX RICHES EN ACIDE PHOSPHORIQUE EN CLIMAT PEU PLUVIEUX DU PALATINAT (RÉSULTATS DE 1938 A 1975)

G. JÜRGENS et H. LANG

Station expérimentale agricole de la B. A. S. F., Limburgerhof, République Fédérale d'Allemagne

RÉSUMÉ

Un essai de fertilisation de longue durée est en cours depuis 1938 à la Station expérimentale agricole du Limburgerhof (R.F.A.) en vue d'examiner l'effet de la fumure minérale sur les rendements et la qualité des récoltes ainsi que sur les différentes caractéristiques locales. Les résultats suivants ont été obtenus :

1° Après environ quarante ans d'essais, les rendements diminuent de près de 50 p. 100 dans les traitements sans fertilisation minérale, malgré l'apport régulier de fumier, par rapport aux traitements NPK.

2° Étant donné les conditions locales mentionnées précédemment, c'est à l'azote qu'échoit le rôle le plus important. A l'exception du cas des légumineuses, les diminutions de rendements sont donc principalement dues au manque d'azote. Le rendement moyen de l'azote, pour toutes les cultures et pour un ensemble de 290 essais, a été de 12,5 kg d'U.C. (Unités Céréales) par kg de N. Le rendement moyen de l'azote a été de 15,4 kg d'U.C. pour les cultures principales (191 essais) et de 6,8 kg d'U.C. par kg de N pour les cultures dérobées (99 essais).

3° La capacité de libération de l'acide phosphorique des sols de la Station étant très bonne et étant donné aussi leur approvisionnement continu en acide phosphorique à partir du fumier, il n'a pas été constaté de différences significatives de rendements par rapport à une fumure NPK dans les cultures n'ayant pas reçu d'acide phosphorique minéral.

4° Le défaut d'apport de potasse a provoqué des diminutions de rendements, surtout dans les cultures sarclées et les cultures dérobées, malgré les épandages réguliers de fumier. Ces diminutions de rendements ont été, en moyenne, au cours de la dernière période d'essai, de 10 p. 100 pour toutes les cultures et de 20 p. 100 pour les cultures sarclées.

5° Des examens de qualité ayant porté sur toutes les cultures ont pu montrer que la fertilisation azotée des céréales améliorait les rendements et la qualité. Dans les cultures sarclées (pommes de terre et betteraves à sucre) la fertilisation azotée a été le facteur déterminant du rendement qualitatif par unité de surface.

6° Le manque d'apports minéraux (P_2O_5 ou K_2O) a déterminé une nette diminution des teneurs en acide phosphorique et en potasse (respectivement 25 et 50 p. 100) par rapport au traitement NPK. En outre, malgré les apports d'acide phosphorique et de potasse sous forme d'engrais minéraux et de fumier, il n'a pas été possible d'empêcher que les teneurs absolues en P_2O_5 et en K_2O du sol ne diminuent avec le temps dans le traitement NPK, le bilan nutritif ayant été légèrement négatif.

7° D'après les études entreprises à la fin de 1975, il semble que les caractéristiques traduisant l'activité du sol (échanges gazeux et intensité de la nitrification) aient été peu modifiées. De même, la teneur du sol en oligo-éléments n'a pas été modifiée de façon significative.

A. — INTRODUCTION

1. — *Objet de l'essai*

En 1938, la Station expérimentale agricole du Limburgerhof, appartenant à la B.A.S.F. Aktiengesellschaft, mettait en place un essai d'assolements avec fertilisation. La question que l'on se posait alors était de savoir : « Quel est l'effet d'une fertilisation minérale sur les rendements, la qualité des récoltes et la fertilité du sol, étant donné les conditions de l'endroit ? » A l'aide de cet essai, il devait être étudié quel serait l'effet des éléments fertilisants majeurs : azote, acide phosphorique et potasse dans un assolement intensif avec cultures dérobées et cultures spéciales.

2. — *Localisation de l'essai*

La Station du Limburgerhof est située dans la plaine du Rhin supérieur entre Spire et Ludwigshafen-sur-Rhin. Cette zone se caractérise par un climat doux ; elle est limitée à l'est par les collines de l'Odenwald et protégée à l'ouest par le massif du Hardt. Son altitude est de 100 mètres au-dessus du niveau de la mer.

a) *Climat.*

En général, le climat y est doux : les printemps, souvent secs, débutent tôt ; l'été est chaud ; l'automne long et ensoleillé ; l'hiver est doux et peu neigeux. La température moyenne annuelle pour les 38 années considérées est de 9,9°C. La pluviométrie moyenne annuelle est de 563 mm. La durée moyenne d'ensoleillement par année est d'environ 1 800 heures.

b) *Le sol.*

D'après son origine, le sol de la Station est constitué de sables alluviaux déposés par le Rhin. La couche arable est par conséquent fortement perméable : il s'agit d'un sable limoneux (Sl) à faible teneur en humus. Les analyses de sol indiquent une teneur en limons et argiles de 13 p. 100 et de 1,2 p. 100 d'humus. Les caractéristiques suivantes ont été déterminées en début d'essai : pH chlorure de potassium : 7,0 ; acidité mesurée dans l'eau : 0,83 ; mg de K_2O pour 100 g de sol, selon NEUBAUER : 20,1 mg ; mg de P_2O_5 pour 100 g de sol, selon NEUBAUER : 8,9 mg. La teneur en acide phosphorique déterminée selon la méthode de NEUBAUER (8,9 mg de P_2O_5 pour 100 g de sol) correspond dans cet essai à une teneur en acide phosphorique selon EGNER de 35 à 40 mg de P_2O_5/100 g de sol. Outre son pH élevé, la caractéristique particulière de ce sol est qu'il possède une aptitude très prononcée à libérer son acide phosphorique.

TABLEAU I

Assolement, engrais et doses dans l'essai de fertilisation de longue durée à partir de 1938 (1)

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

Assolement à partir de 1938 *a*) Cultures principales *b*) Cultures dérobées	Doses			Engrais		
	N	P_2O_5	K_2O	Azote	Acide phosphorique	Potasse
1. *a*) Pommes de terre de primeur (2)	100	50	100	Sulfonitrate d'ammoniaque	Superphosphate	Potasse 40 p. 100
b) Chou moellier	50 + 50	50	120	NCA (5)	—	—
2. *a*) Orge de printemps (2)	40	40	60	NCA (5)	—	—
b) Colza fourrage	35 + 65	60	120	NCA (5)	Scories Thomas	—
3. *a*) Maïs ensilage	40 + 40	50	100	NCA (5)	Superphosphate	Potasse 40 p. 100
4. *a*) Seigle d'hiver	20 + 40	40	80	Sulfonitrate d'ammoniaque	Scories Thomas	—
b) Petits pois (3) fourrag.	20	40	60	Nitrate de soude	Superphosphate	Potasse magnésienne
5. *a*) Pommes de terre tardives (2)	60	40	100	Sulfate d'ammoniaque	Superphosphate	Potasse 40 p. 100
6. *a*) Orge de printemps (2)	40	40	60	NCA (5)	—	—
b) Navettes fourrag.	20 + 60	50	100	NCA (5)	—	—
7. *a*) Maïs grain	40 + 40	50	120	NCA (5)	Scories Thomas	—
8. *a*) Tabac (2)	60	20	200	Urée	Superphosphate	Sulfate de potasse
9. *a*) Seigle d'hiver	20 + 40	40	80	Sulfonitrate d'ammon. + NC (6)	Phosphate Rhénania	Potasse 40 p. 100
b) Colza après chaumes (4)	40 + 40	50	100	NCA (5)	Superphosphate	—

(1) Assolement sur 9 soles avec 9 cultures ; (2) 300 q/ha de fumier ; (3) à partir de 1939 colza fourrage ; (4) à partir de 1939 : petits pois fourrage ; (5) NCA = Nitrate de chaux ammoniacal ; (6) NC = Nitrate de chaux.

TABLEAU 2

Assolement, engrais et doses dans l'essai de fertilisation de longue durée à partir de 1953 (1)
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

Assolement à partir de 1953 *a*) Cultures principales *b*) Cultures dérobées	Doses kg/ha			Engrais		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
1. *a*) Pommes de terre de primeur (2)	100	60	140/200	Sulfonitrate d'ammoniaque	Superphosphate	Potasse magnésienne
b) Betteraves potagères (3)	160	60	160	NCA (6)	Superphosphate	Potasse 40 p. 100
2. *a*) Avoine	40 + 20	60	80/100	NCA (6)	Superphosphate	Potasse 40 p. 100
b) Navette	100	60	100/160	NCA (6)	Scories Thomas	Potasse 40 p. 100
3. *a*) Pommes de terre (4)	100	60	140/200	Sulfonitrate d'ammoniaque	Superphosphate	Potasse magnésienne
4. *a*) Seigle d'hiver	50 + 20	60	80/120	NCA (6)	Scories Thomas	Potasse 40 p. 100
b) Petits pois fourrage						
5. *a*) Betteraves à sucre (5)	50 + 50 + 40	60	160/200	Nitrate de calcium	Superphosphate	Potasse 40 p. 100
6. *a*) Orge de printemps	50	60	80/100	NCA (6)	Superphosphate	Potasse 40 p. 100
b) Colza Lihoraps	50 + 50			NCA (6)	—	—

(1) Assolement sur 6 soles avec 6 cultures ; (2) 240 q/ha de fumier ; (3) ou autres légumes : haricots nains, épinards (fumure adaptée à la culture) ; (4) Pommes de terre mi-tardives à tardives ; (5) 10 kg/ha de bore (acide borique) sur betteraves à sucre ; (6) NCA = Nitrate de chaux ammoniacal.

TABLEAU 3

Assolement, engrais et doses dans l'essai de fertilisation de longue durée à partir de 1970 (1)
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

Assolement à partir de 1970 *a*) Cultures principales *b*) Cultures dérobées	Doses kg/ha			Engrais		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
1. *a*) Pommes de terre de primeur (2)	120 + 40	120	170	NCA (5)	Superphosphate	Potasse magnésienne
b) Betteraves potagères	160	—	160	NCA (5)	—	Potasse 50 p. 100 (6)
2. *a*) Maïs grain (3)	150	150	240	NCA (5)	Superphosphate	Potasse 50 p. 100 (6)
3. *a*) Avoine	80 + 40	80	130	NCA (5)	Phosphate Rhénania	Potasse 50 p. 100 (6)
b) Colza Lihoraps	90	—	—	NCA (5)	—	—
4. *a*) Seigle d'hiver	60 + 30 + 30	60	95	NCA (5)	Phosphate Rhénania	Potasse 50 p. 100 (6)
b) Petits pois fourragers.....	—	—	40	—	—	Potasse 50 p. 100 (6)
5. *a*) Bett. à sucre (2) (3) (3).....	80 + 60 + 40	80 + 60	130 + 95	NCA (5)	Superphosphate	Potasse 50 p. 100 (6)
6. *a*) Orge de printemps	50 + 20	50	80	NCA (5)	Superphosphate	Potasse 50 p. 100 (6)
b) Navettes d'hiver.....	90	—	—	NCA (5)	—	—

(1) Assolement avec 6 cultures sur 3 soles ;
(2) A partir de 1968 : 240 q/ha de fumier; (3) 20-25 q/ha de marne magnésienne (env. 7 p. 100 de MgO) avant le maïs grain et les betteraves à sucre; (4) 10 kg/ha de bore (acide borique) sur betteraves à sucre ; (5) NCA = Nitrate de chaux ammoniacal ; (6) Potasse à 40 et 50 p. 100.

3. — *Réalisation de l'essai*

L'essai de longue durée a été établi selon la méthode classique de MITSCHERLICH avec 6 répétitions. De 1938 à 1952, l'essai a comporté chaque année neuf cultures contiguës avec cultures dérobées le cas échéant (tabl. 1). Entre 1953 et 1964, le nombre des soles a été réduit à six. Les six cultures qui composaient désormais l'assolement, les doses appliquées et le genre d'engrais sont indiqués dans le tableau 2. Le système de l'assolement a été modifié en 1970 pour l'adapter aux conditions d'exploitation intensives actuelles de la zone climatique considérée (tabl. 3).

Fertilisation.

Les éléments fertilisants d'origine minérale ou organique ont été distribués comme indiqué dans les tableaux 1, 2 et 3.

Les différents traitements, dans cet essai, sont les suivants :

Traitements

1. O = témoin non fertilisé,
(engrais minéraux) 2. NP = azote et acide phosphorique,
3. NK = azote et potasse,
4. PK = acide phosphorique et potasse,
5. N = azote,
6. NPK = fertilisation complète avec azote, acide phosphorique et potasse.

Tous les traitements ont reçu une même quantité de fumier. Les résultats nous donneront donc un aperçu des principaux effets de différents apports minéraux N, P et K sur les rendements, la qualité et la fertilité du sol pour une durée d'expérimentation de trente-huit ans.

TA

Effets de la fertilisation minérale sur les rendement
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975

	Total	Cultures principales	Seigle d'hiver	Orge de printemps	Avoine
Années	38	38	31	30	17
Récoltes	290	191	48	47	20
O	66,1	69,5	59,1	72,9	68,2
NP	93,7	94,4	100,8	97,1	99,6
NK	101,0	101,0	100,9	100,9	102,9
PK	69,8	73,9	61,6	78,3	70,7
N	95,2	95,4	99,4	97,3	100,6
NPK	100 = 46,1 (1)	100 = 59,8 (1)	100 = 34,9 (2)	100 = 36,7 (2)	100 = 38,0 (2)

(1) = Rendements en unités céréales (q/ha d'U.C.).
(2) = Rendements en q/ha (céréales et maïs avec 86 p. 100 de MS) ; tabac : séché air ; cultures sarclées

B. — PARTIE PRINCIPALE

1. — *Effet de la fertilisation minérale sur les rendements*

Pour éliminer les variations affectant les rendements d'une année à l'autre dans les différents traitements, le calcul des rendements a été effectué selon la méthode de l'analyse continue par régression linéaire. Les valeurs ainsi obtenues indiquent l'évolution propre aux différents traitements ; elles sont plus ou moins sûres du point de vue statistique. Pour rendre possible la comparaison entre différents rendements, les rendements de chacune des cultures ont été rapportés au traitement NPK correspondant (= 100) et apparaissent en pour cent. Le tableau 4 indique les rendements moyens par année et par culture principale (191 essais différents) pour tous les traitements.

On trouvera, côte à côte, les moyennes des résultats concernant les cultures principales pour la durée de l'essai. Les rendements annuels absolus obtenus après une fertilisation NPK dans chacune des cultures principales ont été exprimés en unités de céréales (U.C.) et rassemblés dans le tableau 5.

Pour des raisons de concision, les résultats concernant les cultures dérobées seront publiés séparément.

a) *Cultures principales.*

Sur les sols légers de l'endroit, l'azote est sans aucun doute l'élément déterminant des rendements par excellence. Lorsque l'azote manque (fig. 1) dans les parcelles non fertilisées aux engrais minéraux ou dans les parcelles n'ayant reçu que les trai-

LEAU 4

s cultures principales de l'assolement

p. 100 (NPK = 100)

Blé d'hiver	Pomme de terre primeur	Pomme de terre tardive	Betterave à sucre	Maïs grain	Maïs ensilage	Tabac
1	31	27	20	15	7	12
1	35	27	25	21	7	12
50,1	63,4	68,3	82,6	85,4	86,6	82,8
107,4	89,7	85,1	91,7	99,0	95,0	98,9
103,9	99,6	101,1	101,2	104,2	97,4	108,1
47,8	68,4	76,0	86,4	83,7	86,7	85,0
109,2	90,3	90,6	93,6	103,0	99,0	98,4
100	100	100	100	100	100	100
= 47,0 (2)	= 242,6 (2)	= 364,5 (2)	= 603,9 (2)	= 53,0 (2)	= 89,2 (2)	= 24,4 (2)

ds frais ; autres cultures : MS).

TABLEAU 5

Rendements de la parcelle NPK (cultures principales) *exprimés en Unités céréales* (UC/ha)
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

Année	Total cultures	Seigle d'hiver	Orge de printemps	Avoine	Pomme de terre primeur	Pomme de terre tardive	Betterave à sucre	Maïs grain	Maïs ensilage	Tabac
1938	41,2	—	29,4	—	51,6	—	—	36,9	47,8	40,4
1939	54,5	33,4	37,3		40,2	108,2		57,9	59,9	44,7
1940	49,4	32,6	31,8		43,1	99,0		40,0	47,5	52,2
1941	34,9	32,3	36,8		21,3	42,3		36,9	38,9	35,9
1942	39,8	30,8	30,3		38,7	75,1		25,3	36,3	42,0
1943	39,9	34,8	32,2		33,2	66,1		29,1	29,6	54,4
1944	40,6	32,7	26,7		35,0	77,2		—	21,1	50,9
1945	42,5	25,3	19,7		49,0	65,2		—	—	53,2
1946	37,8	32,7	39,4		41,3	48,8		37,3		27,0
1947	39,9	22,1	33,0		49,7	54,9		—		—
1948	41,9	23,9	26,9		31,4	80,2		41,6		47,3
1949	37,7	46,1	43,1		33,4	28,2	—	—		—
1950	61,7	28,4	40,5		42,1	77,8	139,9	27,8		75,5
1951	47,8	39,1	39,0		25,9	—	98,9	22,2		61,6
1952	48,0	31,5	31,5		41,2	51,3	84,3	—		—
1953	74,5	26,8	—	29,2	43,5	80,6	192,4			
1954	67,6	47,7	41,6	42,2	47,8	79,9	146,6			
1955	75,8	36,5	46,0	42,1	54,6	97,7	177,7			
1956	73,3	42,1	46,6	43,9	63,1	84,6	159,3			
1957	59,8	34,9	34,4	32,4	38,6	69,5	148,9			
1958	65,4	35,8	29,5	43,6	58,6	85,3	139,4			
1959	50,9	23,3	21,0	20,2	38,3	67,9	134,4			
1960	70,2	39,6	44,1	38,0	46,3	75,8	177,4			
1961	71,4	32,6	35,2	45,8	62,7	76,6	175,4			
1962	62,2	39,5	40,8	28,7	63,9	62,8	137,3			
1963	46,6	40,5	41,7	36,3	68,0	—	—			
1964	55,1	28,4	30,4	22,6	55,2	41,9	152,0			
1965	58,9	—	—	43,8	49,7	83,3	—			
1966	55,8	30,5	—	41,5	—	95,3	—			
1967	89,2	43,2	—	—	—	92,7	131,7			
1968	87,9	41,2	45,8	—	—	—	176,7			
1969	87,4	—	42,4	—	57,9		162,0			
1970	66,7	—	43,6	—	66,8		—	89,7		
1971	59,7	—	—	42,8	51,8		—	84,5		
1972	65,2	59,6	—	49,8	—		—	86,3		
1973	80,2	45,7	—	43,2	—		151,8	—		
1974	94,8	—	50,2	—	—		154,7	79,4		
1975	97,2	47,0[1]	—	—	—		144,7	99,9		
Facteur de conversion culture/unité céréales (U.C.)		1,00	1,00	1,00	0,20	0,20	0,25	1,00	0,45	2,00

[1] 1975 Blé d'hiver.

tements P et K, les diminutions de rendements par rapport à NPK passent d'environ 20 p. 100 au début à plus de 40 p. 100. Cela signifie que la différence de rendements entre « sans fertilisation minérale » et « fertilisation minérale » s'est accrue de 0,5 p. 100 d'U.C. (= 0,3-0,4 q/ha) en moyenne par an pendant la durée de l'essai. Cette tendance montre l'effet de la fertilisation minérale NPK sur le maintien de la fertilité du sol ou la diminution de sa fertilité lorsque l'approvisionnement en engrais minéraux et en particulier en azote fait défaut.

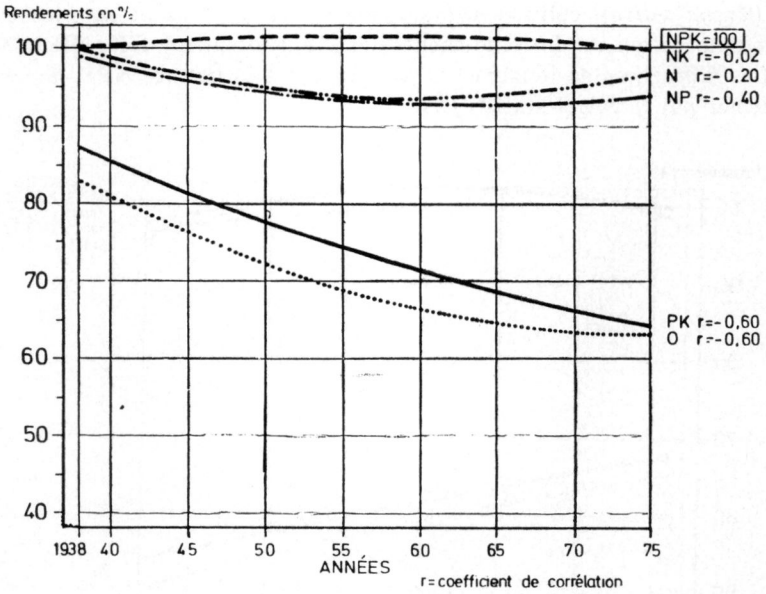


FIG. 1. — *Effet de différents apports d'engrais minéraux sur les rendements des cultures principales d'un assolement* (total)

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)
(Selon une analyse continue par régression linéaire)

Étant donné la grande importance de l'azote pour la formation des rendements en cet endroit, les rendements sur les parcelles ayant reçu uniquement P et K ne dépassent les rendements sans fertilisation minérale que de 5 p. 100 au maximum, ce qui, étant donné les conditions de l'endroit, pourrait être attribué pour la plus grande part à l'effet de la potasse. En revanche, le défaut d'apports minéraux potassiques dans les traitements N et NP provoque une diminution des rendements de près de 10 p. 100. Si l'on compare les coefficients de corrélation (r), on constate une dispersion moins importante en ce qui concerne les traitements sans potasse. Ceci laisse entrevoir un effet assez prononcé de limitation des rendements d'un apport de potasse insuffisant, effet d'ailleurs variable avec les disponibilités du sol en potasse (ces disponibilités dépendant des facteurs climatiques) et les besoins différents des plantes en potasse.

Comme nous le montrent le tableau 4 et la figure 1, aucune réaction n'a encore été perçue à la suite d'un début d'apport d'acide phosphorique minéral. Le sol présente en effet de bonnes propriétés de libération de l'acide phosphorique et, de plus,

il a reçu une quantité importante de fumier : 42 kg de P_2O_5/ha par an pendant la première période de l'essai, puis, plus tard, 20 kg. L'analyse par régression des rendements moyens de toutes les cultures principales de ces dernières années accuse toutefois une légère tendance à la diminution des rendements, les teneurs du sol en acide phosphorique diminuant également, comme nous verrons plus loin.

Seigle d'hiver, orge de printemps et avoine.

Le seigle d'hiver (*Secale cereale*), l'orge de printemps (*Hordeum sativum*) et l'avoine (*Avena sativa*), cultures typiques de cet endroit, montrent une évolution semblable pour ce qui est des rendements dans les traitements NK, NP et N (fig. 2, 3 et 4). Les différences de rendements par rapport à la fumure NPK ne se laissent pas confirmer par le calcul statistique.

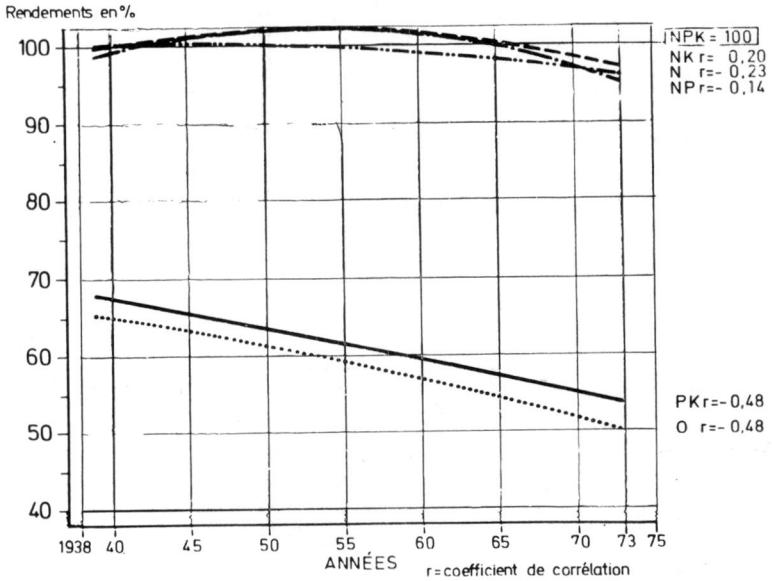
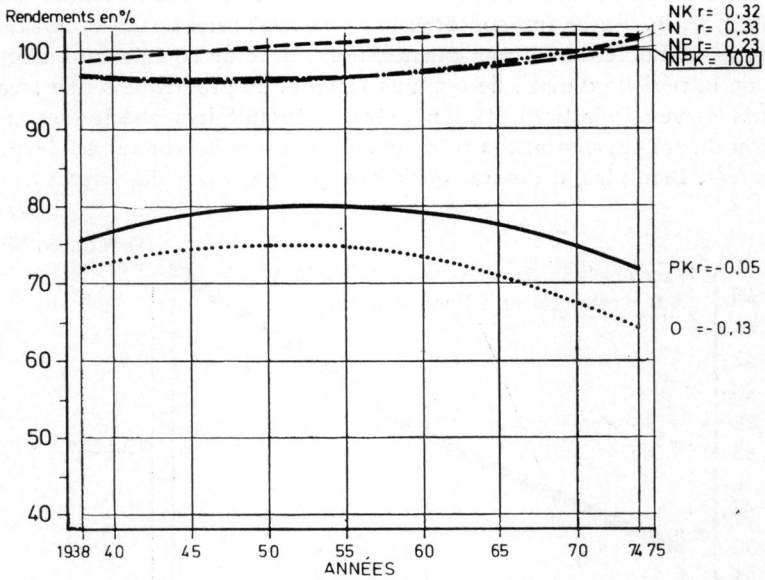


FIG. 2. — *Effet de différents apports d'engrais minéraux sur les rendements en seigle d'hiver*

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)
(Selon une analyse continue par régression linéaire)

En revanche, lorsque l'azote vient à manquer, les rendements diminuent considérablement. Pendant la durée de l'essai, les rendements en seigle d'hiver ont décru de façon assez constante et sont passés d'environ 70 p. 100 à moins de 60 p. 100 par rapport à la fumure NPK. Les rendements diminuent beaucoup plus vite dans le cas de l'avoine, qui n'apparaît que plus tard dans les assolements. Quant au rendement de l'orge de printemps, il demeure jusqu'à présent entre 70 et 80 p. 100 de ceux obtenus avec NPK.

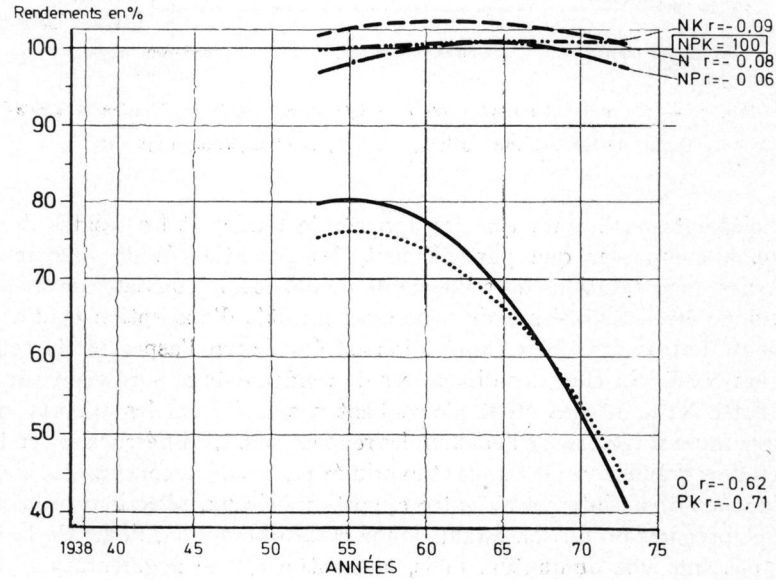
En comparant l'évolution des rendements dans les traitements sans fertilisation minérale et dans les traitements NPK pour une période de près de quarante ans (la comparaison est possible dans les cas du seigle d'hiver et de l'orge de printemps),



r = coefficient de corrélation

FIG. 3. — *Effet de différents apports d'engrais minéraux sur les rendements en orge de printemps*

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)
(Selon une analyse continue par régression linéaire)



r = coefficient de corrélaton

FIG. 4. — *Effet de différents apports d'engrais minéraux sur les rendements en avoine*

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)
(Selon une analyse continue par régression linéaire)

on peut déduire la contribution de la fertilisation minérale à la formation des rendements (fig. 5 et 6). En ce qui concerne le traitement sans fertilisation minérale et l'élévation assez faible de ses rendements, il est utile de signaler que l'apparition, au cours de la période d'essai, de certains facteurs de progrès tels que : variétés à rendements élevés (sélection), traitements phytosanitaires spécifiques, meilleure préparation du sol augmentant la profondeur de la couche arable, ne s'exprime pas complètement. Bien plus, il faudra considérer que, par suite des exportations cons-

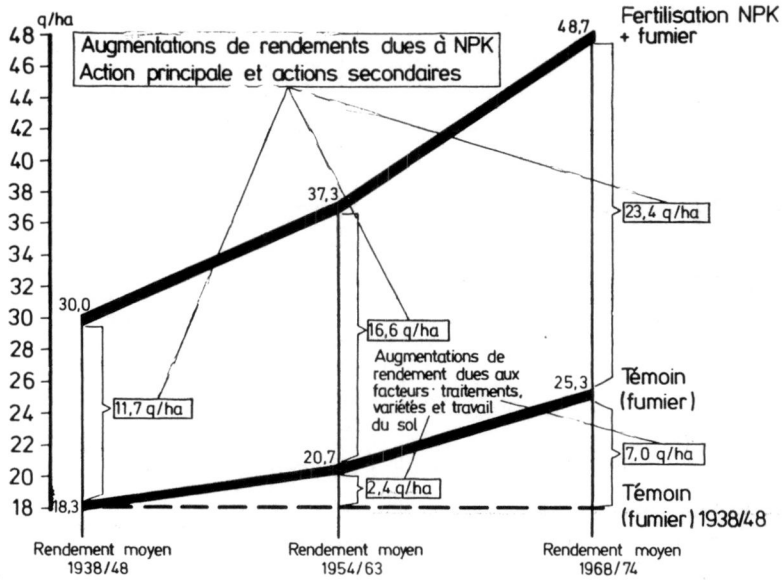


FIG. 5. — *Évolution des rendements en seigle d'hiver après fertilisation minérale*
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

tantes d'éléments fertilisants que les apports de fumier et les résidus de récoltes n'arrivent à compenser que partiellement, les potentialités de rendements ont diminué. Les augmentations de rendements quand même constatées avec le temps peuvent donc être attribuées à de meilleures facultés d'absorption et d'utilisation des éléments fertilisants. Cette supposition est étayée par l'aspect de la courbe des rendements NPK. En effet, les différences de rendements apparaissant sur les graphiques entre NPK et sans NPK n'englobent pas seulement les apports minéraux en tant que cause principale de l'effet sur les rendements. La différence de rendements, de plus en plus grande avec le temps et exprimée par les deux courbes, est bien plutôt la conséquence d'une interaction entre apports minéraux, sélection, protection des cultures et préparation du sol. Étant donné cette interaction, l'effet de la fertilisation n'a pas subi une diminution mais, au contraire, une augmentation. La règle générale selon laquelle environ 50 p. 100 des augmentations de rendements enregistrées dans le courant des dernières années proviennent de la fertilisation est ainsi confirmée. On peut aussi constater que, par exemple, l'influence de la fertilisation, comparée aux autres interventions culturales intégrées, est de beaucoup plus impor-

tante dans le cas du seigle que dans celui de l'orge, quand on sait que l'orge avait été l'objet, dans le temps, de travaux de sélection plus fructueux.

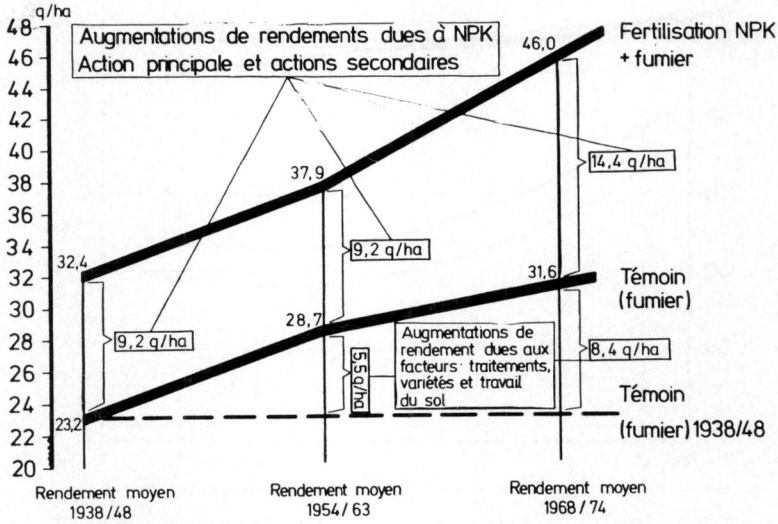


FIG. 6. — *Évolution des rendements en orge de printemps après fertilisation minérale*
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

Pommes de terre de primeur et pommes de terre tardives.

Comme l'indique le tableau 4, on peut tout d'abord constater que les rendements à long terme en pommes de terre de primeur (*Solanum tuberosum*) ont été les mêmes pour la fertilisation NPK (242,6 q/ha) que ceux des pommes de terre tardives sans fertilisation NPK (243,4 q/ha). Ce parallèle nous montre l'importance de la durée de la période de végétation en ce qui concerne la formation des rendements. En pommes de terre de primeur, la fertilisation minérale avait donné une augmentation de rendements d'environ 90 q/ha : en pommes de terre tardives, une augmentation de 120 q/ha. Le défaut d'apport de potasse minérale a provoqué une diminution de rendements moyenne de 36 q/ha pour les pommes de terre de primeur et de 47 q/ha pour les pommes de terre tardives (fig. 7 et 8). Dans le cas des pommes de terre de primeur, la diminution de rendements occasionnée par le manque de potasse est demeurée à peu près constante pendant toute la durée de l'essai ; dans le cas des pommes de terre tardives, les diminutions de rendements perceptibles du fait du manque de potasse ont nettement augmenté dans le temps. De nouveau, l'azote a provoqué les augmentations de rendement les plus accusées ; 1 kg de N a donné des moyennes annuelles de 75 kg de pommes de terre de primeur et de 111 kg de pommes de terre tardives.

De la comparaison entre l'évolution des rendements en pommes de terre de primeur et celle des pommes de terre tardives et en se référant aux traitements avec et sans NPK minéral, il est possible de dégager l'importance des apports minéraux pour la culture de la pomme de terre, comme indiqué sur les figures 9 et 10. Les moyennes des rendements des traitements sans NPK ont été rassemblées par tranches

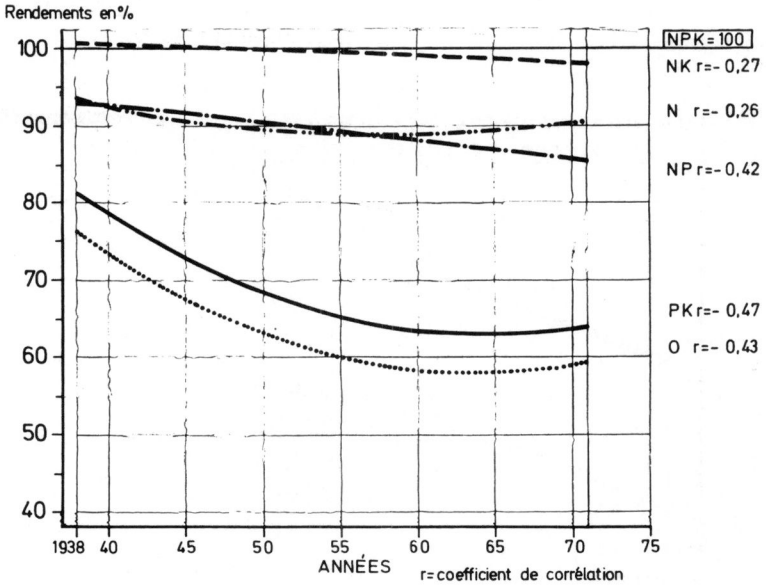


FIG. 7. — *Effet de différents apports d'engrais minéraux sur les rendements en pommes de terre de primeur*

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)
(Selon une analyse continue par régression linéaire)

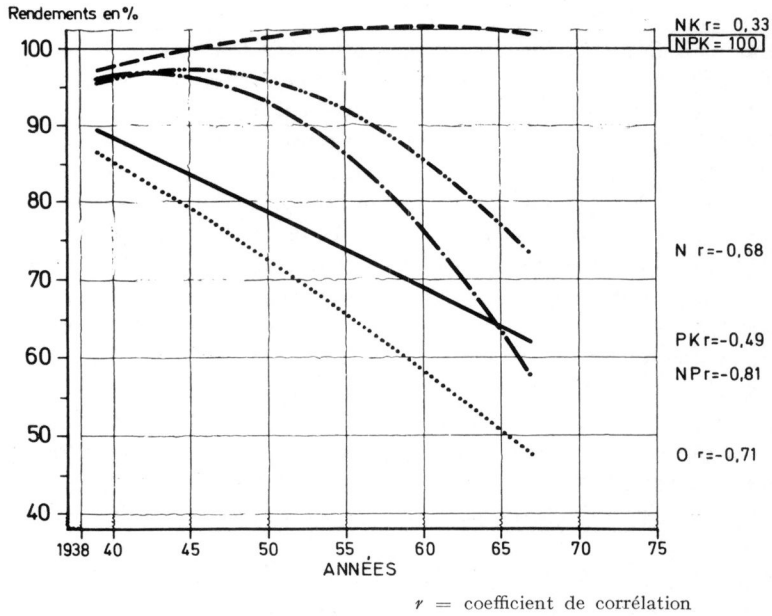


FIG. 8. — *Effet de différents apports d'engrais minéraux sur les rendements en pommes de terre tardives*

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975
(Selon une analyse continue par régression linéaire)

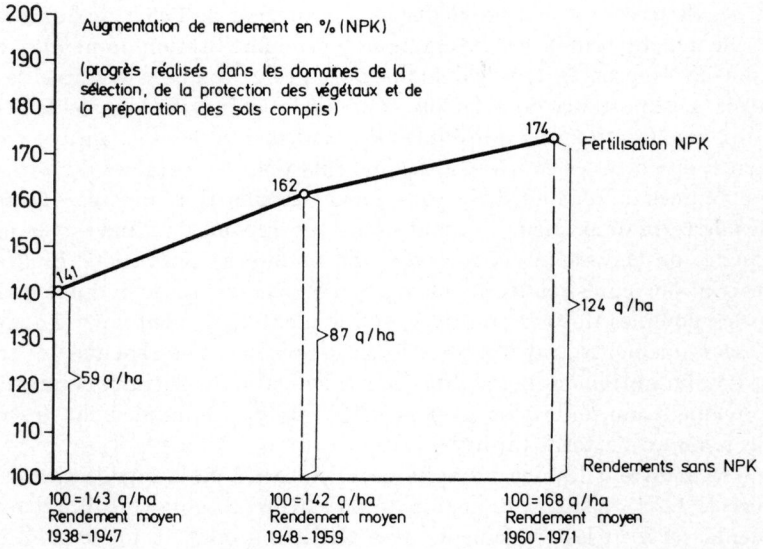


FIG. 9. — *Fertilisation minérale et évolution des rendements : pommes de terre de primeur*
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

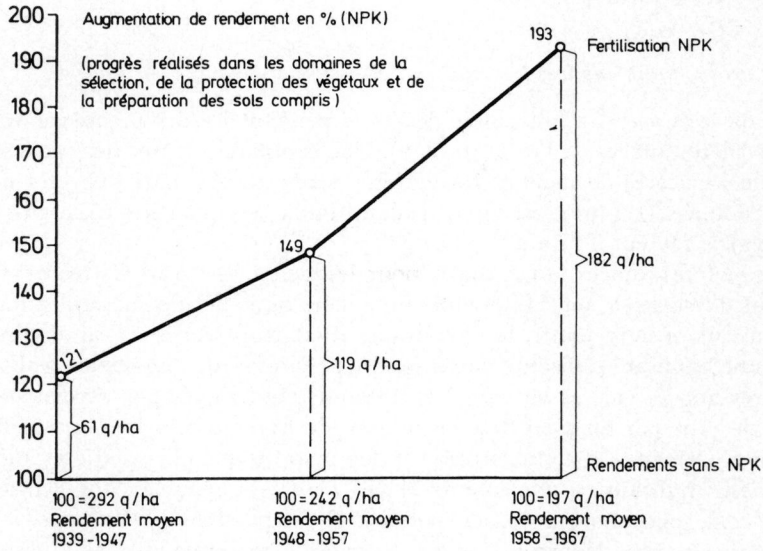


FIG. 10. — *Fertilisation minérale et évolution des rendements : pommes de terre mi-tardives à tardives*
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

de dix ans et elles ont servi au calcul des augmentations de rendements en pour cent. Comme déjà mentionné dans le cas du seigle d'hiver et de l'orge de printemps, la divergence des deux courbes ne provient pas uniquement de l'effet de la fertilisation minérale ; elle reflète toutes les interactions entre fertilisation minérale, variétés à rendements élevés, progrès dans le domaine de la protection des cultures et le machinisme agricole. L'importance de la fertilisation minérale du point de vue de la conservation et de l'amélioration des possibilités de rendements des sols agricoles découle de la comparaison entre les courbes de rendements pour les pommes de terre de primeur et les pommes de terre tardives sans aucune fertilisation minérale. Dans le cas des pommes de terre de primeur — étant donné les apports de fumier et la faiblesse des rendements de la variété cultivée des années durant (la variété *Erstling*), les rendements sont demeurés relativement peu élevés pendant toute la durée de l'essai ; dans celui des pommes de terre tardives, qui avaient également tout d'abord reçu du fumier, les rendements sont tombés d'environ 50 q/ha dans chacune des tranches de dix ans. La diminution des possibilités de rendement dans le traitement sans NPK a très certainement limité de plus en plus les possibilités de rendement des variétés récentes de pommes de terre tardives.

Comme le montrent les deux graphiques, l'efficacité de la fertilisation minérale NPK a avec le temps fortement augmenté en valeur absolue. La différence entre les rendements NPK et les rendements sans NPK, qui était en moyenne d'environ 60 q/ha pendant les dix premières années de l'essai pour les pommes de terre de primeur et les pommes de terre tardives, a augmenté pendant les périodes deux et trois de l'essai, d'environ 30 q/ha (pommes de terre de primeur) et d'environ 60 q/ha (pommes de terre tardives).

Maïs grain, maïs ensilage.

Le maïs (*Zea mays*) a fait partie de l'essai pendant les dix premières années et les cinq dernières années de l'essai (tabl. 6). Une comparaison très intéressante entre les anciennes variétés de maïs et les variétés modernes de maïs hybrides nous est également donnée. La pluviosité annuelle étant faible, les quantités d'eau disponibles sont souvent le facteur limitant.

Les premières années (1938-1951), pour lesquelles les essais ne reçurent aucun supplément d'irrigation, ont été divisées en années où l'effet de la fertilisation minérale ne pouvait se faire sentir, les conditions étant trop sèches, et en années ayant disposé d'une humidité suffisante en raison des précipitations. Les essais réalisés dans les dernières années sur les variétés hybrides ont été irrigués par aspersion une ou deux fois de plus par an pour être en mesure de livrer toutes leurs possibilités en matière de rendements. Il a été surprenant de constater que ni les variétés anciennes, ni les variétés hybrides à rendements élevés n'avaient réagi à l'absence d'apport minéral d'acide phosphorique ou de potasse. Il est possible que le maïs, avec son système racinaire très développé, et étant donné aussi les conditions favorables de l'emplacement de la culture, soit en mesure de profiter des réserves d'éléments fertilisants du sous-sol. Les apports d'azote ont augmenté les rendements des variétés anciennes d'environ 35 p. 100, soit 11 q/ha et, dans les variétés hybrides, d'environ 50 p. 100, soit 29 q/ha. Comme dans le cas du maïs grain, le maïs ensilage a surtout réagi aux seuls apports d'azote (tabl. 4).

TABLEAU 6

Effet de différents apports d'engrais sur les rendements en maïs grain
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

	Rendements grain en q/ha			
	1938-1951 Précipitations		1970-1975	
			sans	avec
	Moyennes à peu importantes 6 essais	Importantes 5 essais	irrigation par aspersion 2 essais	8 essais
1. Témoin	32,1	31,9	33,0	67,1
2. NP	31,2	41,4	86,2	84,6
3. NK	33,8	42,8	82,9	88,9
4. PK	32,3	30,6	34,6	65,3
5. N	33,4	41,5	84,7	86,7
6. NPK	30,5	41,9	86,3	88,4

TABLEAU 7

Effet de divers précédents culturaux sur les rendements en seigle d'hiver
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

Années de comparaison	1939-1947		1948-1952	
n Précédent cultural	9 Tabac + fumier	9 Maïs ensilage	5 Tabac + fumier	5 Pommes de terre tardives
1. Témoin	100	93,6	100	97,0
2. NP	100	92,5	100	96,9
3. NK	100	94,3	100	98,1
4. PK	100	97,1	100	100,4
5. N	100	94,0	100	93,8
6. NPK	100	95,9	100	97,0
Moyenne	100 = 28,0 q/ha	94,6 = 26,5 q/ha	100 = 28,3 q/ha	97,0 = 27,4 q/ha

Les résultats détaillés obtenus sur betteraves à sucre et tabac (tabl. 4 et 5) feront l'objet d'une publication séparée.

b) *Évolution des rendements en fonction de la place du seigle d'hiver dans les assolements.*

Durant les années 1938 à 1952, le seigle d'hiver a occupé différentes places dans les tableaux d'assolement (tabl. 1 et 7). Pendant neuf années comparables, le seigle d'hiver est venu derrière un maïs ensilage et une culture de tabac. La moyenne des 18 traitements ayant reçu une fertilisation indique une augmentation de rendement due au précédent cultural de 4,5 p. 100 après un tabac par comparaison avec un maïs ensilage. Les différences de réaction conditionnées par les traitements dans lesquels un ou plusieurs éléments nutritifs faisaient défaut se situent entre les limites de l'erreur. L'importance du précédent cultural tabac sur les parcelles non fertilisées à la potasse minérale s'est fait sentir un peu plus fortement que dans les autres cas. Par rapport aux pommes de terre tardives sans fumier, l'influence du précédent cultural tabac avec fumier s'exprime par une moyenne annuelle d'environ 3 p. 100 sur cinq années.

2. — *Effet de différents apports d'engrais sur la qualité des récoltes*

a) *Teneur et rendement en protéines brutes* (céréales).

Les moyennes de plusieurs années donnent les teneurs et rendements suivants en protéines brutes pour les différents traitements, en culture de seigle d'hiver, d'orge de printemps et d'avoine (tabl. 8).

TABLEAU 8

Effet de divers apports minéraux sur le taux de protéines brutes et le rendement en protéines brutes en culture de céréales

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

	Protéines (%)			Rendement en protéines brutes					
	Seigle d'hiver	Orge de printemps	Avoine	Seigle d'hiver		Orge de printemps		Avoine	
				q/ha	(%)	q/ha	(%)	q/ha	(%)
Annuels	5	16	3						
Rendements	10	31	6						
1. Témoin	8,9	8,3	9,7	2,1	51	2,2	62	2,0	33
2. NP	9,5	9,6	12,6	3,8	93	3,4	98	5,6	92
3. NK	10,0	9,5	12,4	4,1	100	3,5	99	5,7	93
4. PK	8,8	8,3	9,7	2,1	51	2,3	65	1,9	31
5. N	9,9	9,6	12,3	3,9	95	3,5	99	5,6	92
6. NPK	9,7	9,6	13,5	4,1	100	3,5	100	6,1	100

La teneur en protéines brutes diminue en cas de non apport d'azote minéral. En seigle d'hiver et en orge de printemps, les autres traitements n'ont pratiquement pas révélé de différences quant aux teneurs en protéines brutes. Seule l'avoine, grâce à la fumure NPK, a permis d'obtenir la teneur la plus élevée en protéines brutes.

Le rendement en protéines brutes est aussi un facteur important pour les exploitations utilisant les céréales comme fourrage. Dans les traitements sans N, des rendements faibles en grains ainsi que des teneurs en protéines peu élevées donnent un résultat global décroissant. Contrairement au cas du seigle d'hiver et de l'orge de printemps, les traitements NPK et NK ont été meilleurs en avoine pour ce qui est des rendements en protéines brutes. L'effet de l'apport de potasse minérale sur les rendements en protéines brutes a crû selon une progression : orge de printemps, seigle d'hiver et avoine.

b) *Teneur et rendement en amidon des pommes de terre.*

Le tableau suivant nous montre l'effet de différents apports minéraux sur la teneur et les rendements en amidon des pommes de terre (tabl. 9) :

TABLEAU 9

Effet de divers apports minéraux sur la teneur en amidon et le rendement en amidon en culture de pommes de terre

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

	Pommes de terre de primeur			Pommes de terre tardives		
n	33			26		
	1938-1971			1939-1967		
	Teneur en amidon (%)	Rendement en amidon		Teneur en amidon (%)	Rendement en amidon	
		q/ha	(%)		q/ha	(%)
1. Témoin	14,9	22,2	67,1	16,4	40,4	72,6
2. NP	14,9	31,6	95,5	15,9	48,9	88,0
3. NK	13,9	32,7	98,8	15,1	55,6	100,0
4. PK	14,3	23,0	69,5	15,3	41,7	75,0
5. N	14,7	31,3	94,6	15,8	51,8	93,1
6. NPK	14,0	33,1	100	15,2	55,6	100

Pour ce qui est des moyennes intéressant les pommes de terre de primeur et les pommes de terre tardives, les rendements en tubercules, nettement plus élevés des traitements NK et NPK par rapport aux autres traitements, ont provoqué un léger recul de la teneur en amidon. Le rendement en amidon, qui se calcule à partir du rendement en tubercules et de la teneur en amidon, a été surtout influencé par le rendement en tubercules. Les rendements en amidon dans les traitements sans N minéral sont par conséquent très bas. Les traitements sans potasse montrent également des résultats nettement décroissants.

3. — *Effet de différents apports minéraux sur les caractéristiques de fertilité du sol*

a) *pH et teneurs en éléments fertilisants nutritifs.*

Pour éliminer les différences inhérentes aux méthodes employées ou aux conditions de chacune des années, les valeurs du pH des différents traitements ont été évaluées en pour cent du traitement NPK en prenant les moyennes des tranches de dix années (tabl. 10). Une légère diminution du pH absolu pour toute la durée de

TABLEAU 10

Effet de différents apports de fertilisants sur le pH
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)
pH en p. 100 (fertilisation NPK = 100)

Fertilisation	Teneur initiale 1938	Moyenne des 10 premières années 1940-1949	Moyenne des années 1950 à 1962 (1)	Moyenne des 10 dernières années 1963-1975
	7,0			
1. Témoin		100	98,9	99,4
2. NP		99,0	99,0	99,6
3. NK		98,7	97,8	98,2
4. PK		100,2	101,0	100,2
5. N		98,7	99,1	99,2
6. NPK		100	100	100

(1) En 1939, 1953, 1965, 1970 et 1971, il n'a pas été fait d'analyse du pH.

l'essai ne provoque pas de modifications supplémentaires de ce facteur dans les différents traitements.

Les teneurs du sol en acide phosphorique et en potasse ont été déterminées, selon la méthode de NEUBAUER pendant les dix premières années de l'essai, selon la méthode EGNER-RIEHM à partir de 1948 (méthode du lactate double). Pour éliminer l'influence possible de telle ou telle méthode ou l'influence propre à une année, il a été rassemblé dans le tableau 11 les valeurs en pour cent des traitements P_2O_5 et K_2O considérées par rapport aux traitements NPK = 100, moyennes de chacune des tranches de quatre années (tabl. 11).

Si l'on confronte les valeurs absolues obtenues selon la méthode du lactate double issues d'une tranche telle que celle allant de 1948 à 1952 avec celles, provisoires, de la dernière tranche, on peut constater que les apports minéraux annuels d'acide phosphorique et de potasse ont été insuffisants dans le traitement NPK, même avec fumier, pour maintenir la teneur en éléments aisément disponibles. Outre le facteur exportation, il faut aussi citer le rôle important du vieillissement dans le cas de l'acide phosphorique et celui du lessivage dans celui de la potasse. Les teneurs du sol en acide phosphorique et en potasse ont été évaluées par la méthode de l'analyse

TABLEAU II

Effet de différents apports de fertilisants sur la teneur du sol en acide phosphorique et en potasse

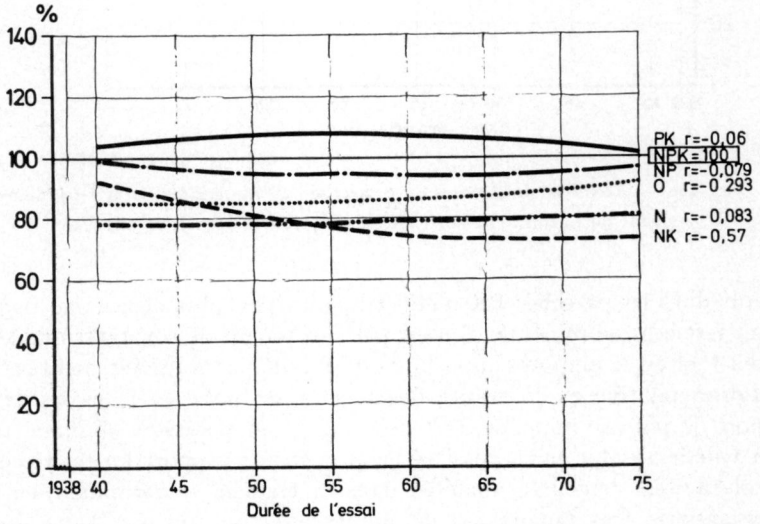
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)
Teneur du sol en P_2O_5 et en K_2O en p. 100 (fertilisation NPK = 100)

	1938-42 (1)	1948-52 (2)	1972-75 (2)	1938-42 (1)	1948-52 (2)	1972-75 (2)
1. Témoin	89	90	91	83	71	70
2. NP	99	100	100	78	58	46
3. NK	91	81	75	106	111	108
4. PK	105	113	100	111	133	148
5. N	88	83	78	73	64	50
6. NPK	100	100	100	100	100	100
(= mg) (3)	(= 9,6)	(= 36,2)	(= 25,8)	(= 20,9)	(= 14,9)	(= 10,5)

(1) Selon NEUBAUER.
(2) Méthode du lactate double.
(3) mg de P_2O_5 ou de K_2O/100 g de sol.

continue par régression linéaire. Pour les mêmes raisons que celles citées précédemment, les valeurs utilisées ont été les pourcentages obtenus par rapport à NPK (fig. 11 et 12).

Par rapport au traitement NPK, les teneurs en P_2O_5 (fig. 11) demeurent relati-



r = coefficient de corrélation

FIG. 11. — *Évolution des teneurs en acide phosphorique du sol en fonction de la fertilisation*

(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)
(Valeurs en p. 100 NPK = 100)

vement constantes pendant toute la durée de l'essai : les teneurs du traitement NP sont légèrement inférieures tandis que celles du traitement N le sont nettement. La fertilisation n'ayant porté que sur P et K, on a pu observer une légère augmentation momentanée de l'acide phosphorique, les rendements (et donc les exportations) ayant été moins importants. Les rendements pratiquement semblables des traitements NPK et NK ont déterminé dans les parcelles sans acide phosphorique une disparition lente mais constante des réserves relativement élevées en acide phosphorique.

Les différences ont été plus éclatantes en ce qui concerne la teneur du sol en potasse au cours de l'essai (fig. 12). La diminution des valeurs absolues de la potasse est au total plus intense que dans le cas de l'acide phosphorique. Étant donné que les

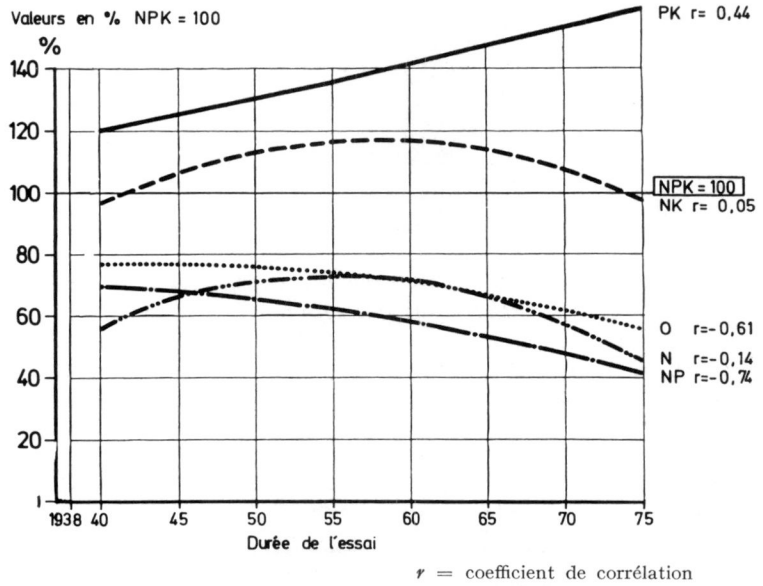


FIG. 12. — *Évolution des teneurs en potasse du sol en fonction de la fertilisation*
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

rendements dans les parcelles PK n'étaient qu'un peu plus élevés que dans les parcelles sans fertilisation minérale, il n'est pas surprenant de constater que les apports annuels en P et en K (apports importants de P et K par le fumier) aient entraîné une augmentation relative et constante des teneurs en potasse. Dans les traitements sans apport de potasse minérale, la teneur du sol en potasse a diminué non seulement en valeur absolue mais aussi en pour cent par rapport au traitement NPK. Cette évolution est demeurée modérée dans la tranche se terminant en 1954, par suite des apports très importants de fumier effectués jusqu'à cette époque. La courbe tout d'abord ascendante des traitements N et NK reflète l'effet des apports de fumier en tant que source de potasse. Les différences de résultats obtenues dans les traitements N et NK montrent l'importance des apports minéraux de potasse.

TABLEAU 12

Effet de différents apports d'engrais minéraux sur la teneur du sol en éléments nutritifs
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

Fertilisation	Limons et argiles < 20 μ (%)	pH (KCL)	P_2O_5 (2) mg/100 g de sol	K_2O (2) mg/100 g de sol	Mg mg/ 100 g de sol	Humus (%)	N total (%)	C.E. (1) me/100 g sol	Cu p.p.m.	B p.p.m.	Mn p.p.m.	Zn p.p.m.	Mo p.p.m.
Avec fumier :													
1. Témoin	16	6,9	26	7	6	1,2	0,060	5,6	21	0,4	84	6,4	2,0
2. NP	16	6,9	28	5	5	1,3	0,056	5,6	20	0,6	85	4,9	< 1,0
3. NK	15	6,9	20	12	6	1,3	0,056	5,2	19	0,6	80	5,5	< 1,0
4. PK	16	7,0	32	19	6	1,3	0,055	5,4	21	0,6	85	5,3	< 1,0
5. N.....	15	7,0	20	6	6	1,2	0,053	5,6	18	0,6	86	5,7	< 1,0
6. NPK.....	15	7,0	30	13	5	1,3	0,053	6,0	19	0,8	98	5,0	< 1,0

Solvants d'extraction : Cu dans HNO_3 chaud ; B et Mo dans H_2O chaud ; Mn, Mg et Zn dans solution de lactate d'ammonium.
(1) C.E. = Capacité d'échange (chlorure de baryum).
(2) Méthode du lactate double.

b) *Analyses de sol particulières.*

En 1975, il a été procédé dans notre Institut de Chimie agricole (Dr JUNG et coll.), en dehors des déterminations habituelles du pH, des teneurs en P_2O_5 et en K_2O, à quelques analyses spéciales dont les résultats apparaissent dans le tableau 12.

Oligo-éléments.

Les différences entre les teneurs en Cu, B, Mn, Zn et Mo sont tellement minimes entre les différents traitements que ces variations devraient également se situer dans les limites de l'erreur.

Humus, N total et capacité d'échange.

Les teneurs en humus sont à peu près les mêmes dans les différents traitements et montrent que malgré les apports élevés et variables en N, P et K et en fumier et malgré les rendements élevés, les matières organiques du sol n'ont pas été épuisées de manière inconsidérée.

La teneur en N total ne diffère également que très peu. La capacité d'échange, évaluée en me/100 g de sol (chlorure de baryum) a été variable dans les différents traitements et cette variabilité demeure dans les limites habituelles de l'erreur. Ces valeurs sont relativement réduites, le sol étant léger.

Activité biologique du sol.

L'activité biologique du sol a été déterminée fin 1975 par évaluation de la production de CO_2 (échanges respiratoires du sol) et de l'intensité de la nitrification. Les résultats se rapportant à la production de CO_2 ont été reportés sur la figure 13

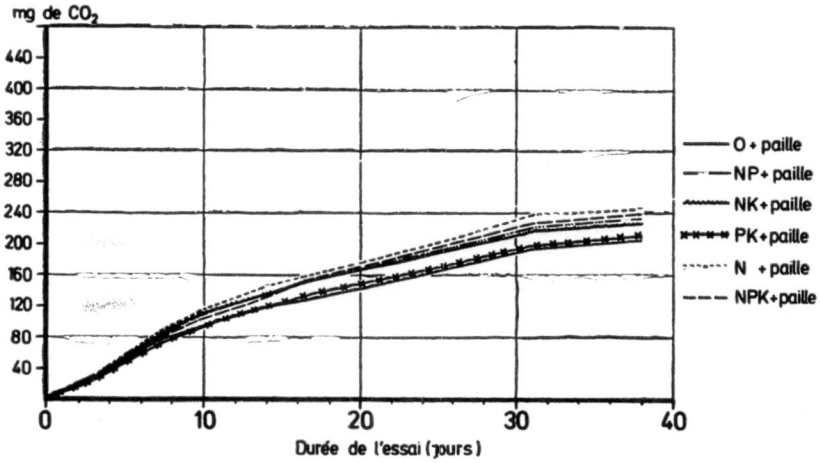


FIG. 13. — *Échanges gazeux du sol* (exploitation avec bétail)
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

(traitements avec fumier) et ne montrent pas de grosses différences quant à l'activité biologique des traitements examinés. Deux essais appartenant aux traitements N (N, NP, NK et NPK) montrent une tendance décroissante par rapport à « sans N », suite à une production un peu plus prononcée de CO_2. Le traitement n'ayant reçu que de l'azote et du fumier forme toutefois exception. Les taux de CO_2 ne sont pas

modifiés par des apports PK, comparés à « non fertilisé ». Les légères différences apparaissant entre les traitements N, NP, NK, NPK, d'une part, et les traitements « témoin » et PK, d'autre part, se situent dans les limites de l'erreur affectant ce genre d'évaluation. Les examens portant sur l'intensité de la nitrification (fig. 14), mesu-

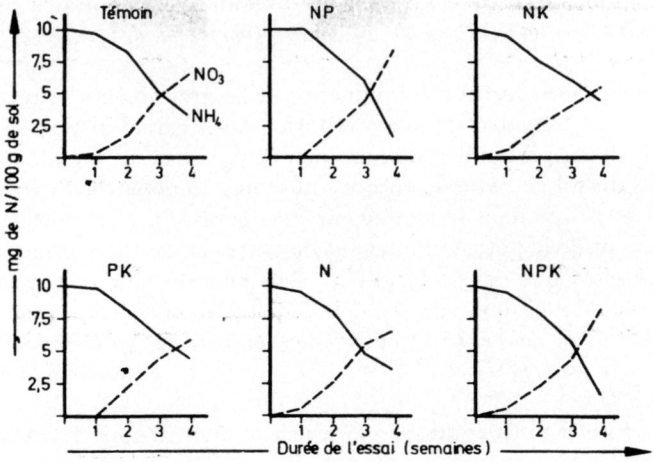


FIG. 14. — *Intensité de la nitrification* (exploitation avec bétail)
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

rée à intervalles d'une semaine d'après la rapidité de transformation des ions ammonium en ions nitrate, n'ont pas livré non plus de différences tranchées entre les traitements examinés. Pour ce qui est du retard observé dans les traitements « témoin » et NP (fig. 15), il est peu problable que l'on puisse lui attribuer une cause sûre du point de vue statistique.

4. — *Discussion*

Un essai de fertilisation de longue durée mis en place en 1938 avait pour but de déterminer l'effet des éléments nutritifs principaux azote, acide phosphorique et potasse sur les rendements et la qualité des cultures ainsi que sur les facteurs de fertilité du sol.

Étant donné les conditions de l'endroit, les apports moyens annuels suivants ont été appliqués sous forme d'engrais minéraux : 119 kg/ha de N, 75 kg/ha de P_2O_5 et 145 kg/ha de K_2O et sous forme de fumier : 60 kg/ha de N, 30 kg/ha de P_2O_5 et 70 kg/ha de K_2O. A cause des conditions locales déjà mentionnées, c'est l'action de l'azote qui y est la plus perceptible. La moyenne de trente-huit années d'expérimentation et de 116 essais en céréales permet de dégager un rendement de l'élément azote de près de 19 kg de grain par kg d'azote.

Dans le cas des pommes de terre de primeur, ce rendement azoté a atteint près de 75 kg (15 kg d'U.C.), dans celui des pommes de terre tardives, 111 kg de tubercules (22 kg d'U.C.). En culture de betteraves à sucre, 1 kg de N a donné 66 kg de betteraves (13 kg d'U.C.). La moyenne des pommes de terre et des betteraves à sucre (sans leurs feuilles) donne ainsi, après conversion en unités de céréales : 17 d'U.C.,

donc un résultat comparable à celui obtenu en céréales. L'exemple du maïs grain nous montre de quelle manière l'utilisation de l'azote minéral par les plantes est fonction du potentiel génétique des plantes cultivées : à condition de disposer de suffisamment d'eau, les variétés à inflorescences libres donnent en moyenne, pour 1 kg de N, 14 kg de grain tandis que les hybrides livrent 19 kg de grains (moyennes de plusieurs années). *Au total, 1 kg de N donne (moyenne des cultures principales, 191 essais) 17 kg d'U.C.*

Les traitements sans fertilisation minérale et les traitements ayant reçu uniformément P et K ont d'ailleurs subi une infestation assez caractéristique de mauvaises herbes ; on pouvait en particulier y remarquer la présence de *Vicia tetrasperma*.

Les réserves du sol en potasse, encore suffisantes au début de l'expérimentation, ont diminué de 50 p. 100 dans le traitement sans potasse par rapport au traitement NPK. Le rendement de la potasse (moyenne de toutes les cultures principales, 191 essais) n'a été toutefois que de 3,1 kg d'U.C. Une analyse plus poussée des cultures principales ne nous donne que 0,56 kg d'U.C. pour les céréales par kg de K_2O. En revanche, *1 kg de K_2O donne 19 kg de pommes de terre de primeur (3,8 kg d'U.C.), 37 kg de pommes de terre tardives (7,3 kg d'U.C.) et 25 kg de betteraves à sucre (sans feuilles) (6,3 kg d'U.C.).*

Bien que les faibles teneurs du sol reflètent le manque d'apport d'acide phosphorique minéral pratiqué pendant des années, les parcelles n'ayant pas reçu d'acide phosphorique (teneur actuelle en P_2O_5 : 20 mg, par rapport à 30-40 mg de P_2O_5/100 g de sol auparavant) ne traduisent pas de carence en cet élément. Étant donné la bonne capacité de libération du P_2O_5 par le sol, les rendements en produits récoltés n'ont pas été influencés.

La relation entre l'efficacité d'une fertilisation minérale NPK et les conditions locales nous est démontrée par les résultats d'un essai de longue durée réalisé sur les parcelles du lieu-dit « Bruch » en 1957 et situé à 1 000 m seulement de la Station : on y observe une nette tendance à la diminution des rendements sur les parcelles présentant une carence en acide phosphorique (LANG et JÜRGENS, 1976) (voir aussi KÖHN, 1973).

Comme déjà mentionné, les teneurs du sol en acide phosphorique et en potasse dans les traitements correspondants de l'essai de fertilisation de longue durée mis en place en 1938 ont diminué respectivement de 25 et 50 p. 100 par rapport au traitement NPK. D'autre part, il n'a toutefois pas été possible d'empêcher que les teneurs absolues en P_2O_5 et K_2O dans le traitement NPK ne diminuent avec le temps, même moyennant l'apport d'acide phosphorique et de potasse sous forme minérale ou sous la forme de fumier. A cette diminution, il est difficile d'attribuer une cause tenant aux méthodes employées. Comme on peut s'en rendre compte à la lecture des valeurs du tableau 13, les résultats des analyses de sol effectuées en 1947 dans une parcelle expérimentale située dans le voisinage immédiat et les résultats concernant les échantillons du même sol conservés de 1947 à 1975 puis soumis à l'analyse selon la méthode du lactate double, après une période de conservation de près de trente ans, n'ont pratiquement pas varié.

Il est possible que les diminutions des teneurs en acide phosphorique et en potasse dans le traitement NPK soient dues à des modifications de nature physique ou chimique du sol (phénomène de vieillissement de l'acide phosphorique, lessivage de la

TABLEAU 13

Analyses de sol comparables obtenues par la méthode du lactate double

Année	mg de P_2O_5/100 g de sol						Moyenne
1947	54	23	33	33	24	49	36
1976 (1)	59	25	39	37	23	57	40
Année	**mg de K_2O/100 g de sol**						**Moyenne**
1947	16	18	12	13	14	15	15
1976 (1)	13	17	12	11	11	13	13

(1) Échantillons de sol prélevés en 1947, conservés, analysés en 1976.

potasse, etc.). Le phénomène du vieillissement de l'acide phosphorique a été traité en détail entre autres dans les ouvrages de SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL (1960), d'AMBERGER *et al.* (1962, 1969), de WERNER (1970), de KICK *et al.* (1972) et de JUNG (1967) ; le lessivage a fait l'objet de travaux détaillés de VÖMEL (1966), de JUNG et DRESSEL (1969).

Dans un bilan nutritif théorique, on trouvera enfin un aperçu des teneurs en acide phosphorique et en potasse disponibles pour les plantes (tabl. 12, fig. 11 et 12). On trouvera dans le tableau 14 les apports d'éléments nutritifs (apports d'engrais

TABLEAU 14

Bilan nutritif théorique de l'acide phosphorique et de la potasse
(Essai de fertilisation de longue durée, Limburgerhof, 1938-1975)

Traitement	O		NK		NPK	
Éléments en kg/ha	P_2O_5	K_2O	P_2O_5	K_2O	P_2O_5	K_2O
Apport total	1 272	2 964	1 272	8 746	4 148	8 746
Exportations, total	1 692	6 083	2 714	9 505	2 741	9 502
Apport-Export de 1938 à 1975 (utilisation à 100 p. 100 = bilan brut)	— 420	— 3 119	— 1 442	— 759	+ 1 407	— 756
Utilisation à 50 p. 100 du P_2O_5 apporté (= bilan net de l'acide phosphorique)	— 1 056		— 2 078		— 667	
Utilisation à 80 p. 100 de la potasse (= bilan net de la potasse)		— 3 712		— 2 508		— 2 505

minéraux + fumier + précipitations) et les chiffres moyens ou livrés par l'expérience concernant les pertes d'éléments (exportations par les récoltes, lessivage). Le bilan brut (dans lequel on suppose que les éléments nutritifs apportés ont été théoriquement utilisés à 100 p. 100) donne la plupart du temps des résultats négatifs, sauf dans les traitements avec apport d'acide phosphorique minéral.

Selon AMBERGER (1962) et KNAUER (1968), un acide phosphorique apporté par des engrais n'est utilisé au maximum qu'à 50 p. 100 même à long terme. Si l'on veut bien considérer ce fait, le bilan net de l'acide phosphorique dans la parcelle NPK sera également négatif. Ceci nous explique aussi la diminution des teneurs en acide phosphorique disponible pour les plantes constatée après analyse du sol : le phénomène du « vieillissement » de l'acide phosphorique en est certainement la cause principale.

Reçu pour publication en septembre 1976.

SUMMARY

LONG-TERM FERTILIZER TRIAL ON PHOSPHATE-RICH LOAMY SAND IN THE LOW RAINFALL AREA OF THE PALATINATE (RESULTS OF TRIAL FROM 1938 TO 1975)

Since 1938 the effect of mineral fertilizers on the yield and quality of field crops and on various features of soil fertility have been investigated in a nutrient-deficiency permanent trial under the conditions existing at Limburgerhof Agricultural Research Station. The following results have been obtained.

1. When in the trial covering almost 40 years, no mineral fertilizers were applied but there were regular dressings of farmyard manure, yields dropped up to 50 p. 100 below the yield level of the NPK fertilizer variant.

2. On account of the conditions at the site of the trial the effect of the nitrogen assumed very great importance. Except in the case of the leguminous crops, therefore, the lower yields were mainly due to the deficient supply of nitrogen. On an average of all the crops and in a total of 290 trials the productive capacity of nitrogen was 12.5 kg of grain equivalent unit per kg of N. On an average with the main crops grown in 191 trials this value was 15.4 kg of grain equivalent unit and on an average of 99 intercrops trials it was 6.8 kg of grain equivalent unit per kg of N.

3. Because of the soil's favourable continual phosphate supply, which is typical of this location, and the constant supply of phosphate through the farmyard manure the yields of the various crops, when there were no mineral phosphate dressings, have not up to now been significantly different from those when an NPK fertilizer has been applied.

4. The absence of mineral potash dressings in spite of regular supplies of farmyard manure led, particularly in the case of root crops and intercrops, to reductions in yields of 10 p. 100 in the final section of the trial on an average with all the crops and of 20 p. 100 on an average with the root crops.

5. Investigations into the quality of the various field crops have shown that it is possible to improve the yield and quality of cereals with N dressings ; in the case of the root crops, potatoes and sugar beet, it was, after all, N dressings that were the factor governing the quality per unit of area.

6. The absence of a mineral nutrient supply of P_2O_5 and K_2O caused a definite drop in the contents of phosphate and potash of 25 p. 100 and 50 p. 100 respectively below the level of the NPK variant. Furthermore, in spite of the supply of phosphate and potash in the form of mineral fertilizers and farmyard manure it was not possible to prevent the soil's absolute supply of P_2O_5 and K_2O from dropping in the course of time even when using the variant, since the balance was slightly negative.

7. According to investigations carried out at the end of 1975, however, the biological activity of the soil, as measured by soil respiration and the intensity of nitrification, appears to have hardly been affected. Nor has the soil's content of trace nutrients undergone any significant change.

ZUSAMMENFASSUNG

LANGJÄHRIGER DÜNGUNGSVERSUCH AUF PHOSPHATREICHEM LEHMIGEM SAND IM REGENARMEN GEBIET DER VORDERPFALZ (VERSUCHSERGEBNISSE 1938-1975)

Seit 1938 wurde die Wirkung der Mineral-Düngung auf Ertrag und Qualität von Feldfrüchten sowie auf verschiedene Merkmale der Bodenfruchtbarkeit in einem Nährstoffmangel-Dauerversuch unter den Standortverhältnissen der Landwirtschaftlichen Versuchsstation Limburgerhof untersucht. Folgende Ergebnisse wurden erzielt :

1. In dem fast 40-jährigen Versuch fielen die Erträge bei fehlender Mineraldüngung trotz regelmässiger Stallmistgabe bis 50 p. 100 unter das Ertragsniveau der NPK-Düngungs-Variante zurück.

2. Aufgrund der Standortverhältnisse kommt der Stickstoffwirkung die grösste Bedeutung zu. Die Mindererträge wurden, Leguminosen ausgenommen, daher vornehmlich durch mangelnde Stickstoff-Versorgung verursacht. Im Mittel aller Kulturen und insgesamt 290 Versuchen betrug die Erzeugungsleistung von Stickstoff 12,5 kg G.E. pro kg N. Im Durchschnitt der in 191 Versuchen angebauten Hauptfrüchte belief sich dieser Wert auf 15,4 kg G.E. und im Mittel der 99 Zwischenfrucht-Versuche auf 6,8 kg G.E. pro kg N.

3. Infolge des standorttypischen günstigen Phosphatnachlieferungsvermögens sowie der laufenden Phosphat-Zufuhr über den Stallmist reagierten die einzelnen Kulturen bei Unterlassung der mineralischen Phosphatdüngung ertragsmässig bis jetzt noch nicht signifikant gegenüber NPK-Düngung.

4. Fehlende mineralische Kali-Düngung führte trotz regelmässiger Stallmist-Zufuhr besonders bei Hack- und Zwischenfrüchten zu Mindererträgen, die im letzten Versuchsabschnitt im Durchschnitt aller Kulturen bei 10 p. 100 lagen, im Durchschnitt der Hackfrüchte bei 20 p. 100.

5. Qualitätsuntersuchungen bei den einzelnen Feldfrüchten zeigten, dass durch N-Düngung bei Getreide Ertrag und Qualität verbessert werden konnten ; bei den Hackfrüchten Kartoffeln und Zuckerrüben war die N-Düngung letztlich der den Qualitäts-Ertrag pro Flächeneinheit bestimmende Faktor.

6. Fehlende mineralische Nährstoffversorgung mit P_2O_5 bzw. K_2O bewirkte ein deutliches Absinken der Gehalte an Phosphat und Kali um 25 p. 100 bzw. 50 p. 100 unter das Niveau der NPK-Variante. Darüber hinaus konnte trotz Phosphat- und Kali-Zufuhr in Form von Mineraldünger und Stallmist nicht verhindert werden, dass der absolute P_2O_5- und K_2O-Versorgungsgrad des Bodens auch in der NPK-Variante mit der Zeit abgenommen hat, da die Bilanz leicht negativ war.

7. Aufgrund Ende 1975 durchgeführter Untersuchungen scheint die biologische Aktivität des Bodens, gemessen an Bodenatmung und Nitrifikationsintensität, dagegen kaum beeinflusst worden zu sein. Der Gehalt an Spurennährstoffen des Bodens erfuhr ebenfalls keine signifikante Veränderung.

РЕЗЮМЕ

Долгосрочные опыты удобрения песчанно-суглинистых почв богатых фосфорной кислотой. в засушливом климате Палатината (результаты с 1938 по 1975).

Г. ЮРГЕНС, Г. ЛАНГ.

На экспериментальной сельскохозяйственной Станции в Лимбургергофе (Ф.Р.Г.) с 1938-го года проводится долгосрочный опыт удобрения,

для изучения действия минеральных удобрений и навоза на урожайность культур и качество урожая, а также на различные местные характерности. До сих пор получены были следующие результаты :

1. По истечении около 40 лет опыта и, несмотря на регулярное внесение навоза, урожайность уменьшилась приблизительно на 50 % в вариантах без минерального удобрения, по сравнению с вариантами внесения NPK.
2. В виду вышеуказанных местных условий, внесение азота имеет первенствующее значение. Уменьшение урожайности, за исключением урожаев овощей, вызывается следовательно, главным образом недостатком азота. Средняя продуктивность азота для общего числа в 290 опытов с подопытными культурами представляла 12,5 хлебных единиц на 1 кг N. Для главных культур (191 опыт) эта средняя продуктивность представляла 15,4 хлебных единиц на 1 кг N, а для промежуточных культур (99 опытов) она была в 6,68 хлебных единиц/кг N.
3. В виду способности почв Станции освобождать крупные количества фосфорной кислоты, и постоянного внесения фосфора навозом, не было найдено показательной разницы между урожайностью культур не получавших минерального фосфора и культур получавших полное минеральное удобрение NPK.
4. Недостаток калия в удобрении вызывал падение урожайности, особенно в случаях пропашных и промежуточных культур, несмотря на регулярное внесение навоза. Эти потери урожайности представляли в среднем, в течении последнего периода опыта, 10 % для большинства культур и 20 % только для пропашных.
5. Изучение качества урожаев показало, что внесение азотных удобрений улучшало как урожайность злаков, так и качество собранного урожая. Для пропашных культур (картофель, сахарная свекла) азотное удобрение представляло главнй фактор качества урожая на единицу площади.
6. Отсутствие P_2O_5 или K_2O в удобрении вызывало сильное ослабление выноса фосфора и калия урожаем (соответственно на 25 и 50 % по сравнению с вариантом обработки NPK). Кроме того, даже несмотря на внесение как фосфора, так и калия в форме минеральных удобрений или в виде навоза, не было возможности воспрепятствовать прогрессивному уменьшению абсолютных содержаний P_2O_5 и K_2O в почве со временем, также и в случае обработки NPK, ибо питательный баланс носил в этом случае немного отрицательный характер.
7. Если судить по изучению предпринятому в 1975-м году, характерности, по которым обычно судят об активности почвы (газообмен, интенсивность нитрификации), изменились за время опыта мало. Содержание микроэлементов в почве также не подвергнулось показательным изменениям

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AMBERGER A., WOLF E., HUNNIUS W., 1957. Über die Wirkung einer langjährigen Phosphorsäuredüngung mit Handelsdüngern und Stallmist auf Boden und Pflanze. *Bayerisches Landw. Jahrbuch*, **34** (2), 229-248.

AMBERGER A., SOMMER G., SÜSS A., 1969. Umsetzungen von wasserlöslichem Düngerphosphat in verschiedenen Böden. *Landw. Forschung*, **22**, 10-25.

JUNG J., 1967. 40 p. 100 water soluble P_2O_5 in NPK-fertilizer is sufficient for soils with a normal phosphate level. *17th Annual meeting of the fertilizer industry*, Nov. 1967 in Washington.

JUNG J., DRESSEL J., 1969. Das Verhalten von Kalium in zwei unterschiedlichen Böden eines 10-jährigen Lysimeterversuches in Abhängigkeit vom Düngungstermin. *Z. Acker- und Pflanzenbau*, **130**, 33-44.

KICK H., MINKAS R. S., 1972. Die Verfügbarkeit der durch langjährige Düngung im Boden angereicherten Phosphate. *Landw. Forschung*, **25**, 184-191.

KNAUER N., 1968. Über die Abhängigkeit des laktatlöslichen Nährstoffgehaltes des Bodens von der Nährstoffanreicherung durch die Düngung. *Z. Acker-und Pflanzenbau*, **127** (2), 89-102.

KÖHN W., 1973. *Der Einfluss langjähriger ackerbaulicher und pflanzenbaulicher Massnahmen auf die Eigenschaften und die Ertragsleistung eines Sandbodens unter besonderer Berücksichtigung getreidereicher Fruchtfolgen.* Dissertation, Berlin.

LANG H., JÜRGENS G., 1976. Bedeutung der mineralischen NPK-Düngung im Kartoffelbau. *Der Kartoffelbau*, **27** (3), 80 + 82.

LÜDECKE H., 1954. Der Begriff des bereinigten Zuckerertrages als Bewertungsgrösse für die Leistung der Zuckerrübe. *Landw. Forschung*, **7** (1), 24-30.

SCHEFFER F., SCHACHTSCHABEL P., 1960. *Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde*, Teil 1 : Bodenkunde.

VÖMEL A., 1966. Versuch einer Nährstoffbilanz am Beispiel verschiedener Lysimeterböden. I. Mitteilung : Wassersickerung und Nährstoffhaushalt. *Z. Acker- und Pflanzenbau*, **123** (2), 155-188.

WERNER W., 1970. Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit des durch langjährige Phosphatdüngung angereicherten Bodenphosphats. I. Mitteilung : Die Verfügbarkeit der Umwandlungsprodukte in sauren Boden. *Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **126** (2), 135-150.

DISCUSSION GÉNÉRALE — GENERAL DISCUSSION

M. CESCAS.

Question : Pr MOREL, n'est-il pas vrai qu'un entendement des résultats devrait automatiquement inclure les rapports C/N/P/S et leurs effets respectifs sur la flore microbienne, donc la biochimie et la minéralisation ou réorganisation (immobilisation dans le langage anglophone) des divers éléments ?

R. MOREL.

Réponse : Les coefficients y et w, dont la considération est essentielle, sont étroitement dépendants de l'activité microbienne et, de plus, pour w, des pertes « physiques » du sol dues notamment au drainage. Il est dès lors évident que l'azote, le carbone, le soufre et le phosphore, ainsi que leurs rapports, sont des facteurs de variation des coefficients concernés. Une étude homologue de celle de l'azote, engagée sur le carbone, permettra dans un premier temps, d'aborder la question du rapport C/N.

L. GACHON.

Question : Avez-vous une idée de la manière dont évolueraient les coefficients w et k si au lieu d'associer NPK et fumier (traitement depuis 1965), on avait renforcé soit la seule fumure minérale azotée (ex. 2 NPK), soit la seule fumure organique (ex. 2 F) ?

R. MOREL.

Réponse : Il est à présumer que les valeurs de w et de k sont en relation, pour un sol donné, avec le rapport C/N de l'ensemble des substances apportées au sol. Une étude complémentaire faite sur le carbone est sans doute nécessaire pour tenter de prévoir le sens de variation des coefficients w et k. Toutefois, d'après les résultats indiqués sur le tableau 3, il est probable qu'une augmentation de la fertilisation minérale seule conduirait à une diminution de la valeur de k.

R. SÉVERAC.

Question : Pour un assolement classique de la région parisienne, a-t-on pu calculer quelle dose minimum de fumier (ajoutée à la fumure classique NPK), il faudrait apporter pour maintenir le taux de matière organique ? Quelle extrapolation peut-on faire pour des climats et sols différents ?

R. MOREL.

Réponse : La quantité de fumier nécessaire pour entretenir le taux de matière organique d'un sol est liée aux besoins en carbone de ce sol, ceux-ci dépendant de plusieurs facteurs dont on peut penser qu'ils comprennent : le rapport C/N du sol

considéré, l'importance quantitative des apports d'azote, les taux de réorganisation de l'azote et du carbone. Une étude complémentaire faite notamment sur l'évolution du carbone permettra peut-être de proposer une solution plus satisfaisante au problème posé. Je ne peux actuellement donner de réponse valable à la seconde question.

Ph. GAUTIER.

Question : Avez-vous étudié dans les parcelles du champ Dehérain, l'évolution du rapport C/N du sol ? Cette détermination confirme-t-elle les conclusions que vous avez avancées sur l'influence de l'azote minéral quant à l'évolution de l'azote organique du fumier ?

R. MOREL.

Réponse : Le rapport C/N des parcelles Dehérain demeure pratiquement constant dans le temps et selon les divers traitements pratiqués. Cette observation est également rapportée pour d'autres dispositifs expérimentaux de longue durée. Dès lors, la référence au rapport C/N peut vraisemblablement constituer un appui pour des études sur l'évolution de l'azote incorporé au sol sous ses deux formes minérale et organique. Nous pensons pouvoir étudier ce problème.

A. COTTENIE.

Question : We found similar pH and Cd contents in crops grown on soils being more than 10 times higher in these elements, due to pH-linked mobility of these elements.

In how far is the *factor mobility acting* in your experiments ?

A. DAM KOFOED.

Answer :

— pH has a clear and important influence on the mobility of heavy metals.
— The mobility of heavy metals are not investigated in these experiments.

A. VEZ.

Question : Concerning the N content in FYM : is it the total N or the available N ?

A. DAM KOFOED.

Answer : It is the total N.

S. LAG.

Question : Referring fig. 3 : Humus content of the soil, farmyard manured and NPK fertilizers, which rotation was used ?

A. DAM KOFOED.

Answer : The crop rotation referring to fig. 3 is wheat-root crops-barley-clover-grass.

M. P. CESCAS.

Question : Here again heavy metals were discussed. I want to know the followings :

1) Were the figures presented for total Pb and total Cd ? How was the analysis done ?

2) What was the pH of the soil?

3) To your knowledge has Cd shown to be toxic in human food and which one?

4) Are you intending to use « available forms » in subsequent work? Why aren't we all analyzing for uranium, yttrium, lanthanum, etc.? These could all be toxic as well since all seem to be residues of rock phosphates used in the manufacture of soluble phosphatic materials... I sincerely think we are wasting our time with some of these elements in general (except in very specific cases of contamination).

A. DAM KOFOED.

Answer :

1) It is total Pb and Cd. The analysis were done by atomic absorption ;

2) pH in the soil was 6.8 ;

3) Too high Cd-intake can after years be followed by Cd storing in Kidneys and give diseases, but under normal use of fertilizer so small amount of Cd and Pb is added to the soil, so it will influence the crops only to a very little extent ;

4) Most elements can be toxic in overdoses.

M. PACCOLAT.

Question :

About Cadmium, have you any analysis of other crops than cereals, sugar beet and turnips?

Are any crops having better possibilities to absorb Cadmium for example : celery and lettuce?

A. DAM KOFOED.

Answer :

Yes, for different agricultural crops and vegetables, and different crops differ in uptake.

A. E. JOHNSTON.

Question :

Comment rather than question...

We have evidence of soil movement in the long-term Rothamsted experiments. Our experience is that estimating the amount of readily soluble P and K, particularly bicarbonate soluble P is a good index of the fact that there has been movement of soil across plot boundaries.

J. LINDHARD.

Answer

As for the comment from Dr Johnston I can say that also in my figures 10 and 11 some movement of P and K is seen. To this can bee mentioned an investigation of Dr DAM KOFOED in 1959 where huge amounts of superphosphate was given to a field and handled heavy with implements showed a tremendous movement of soil across the border.

M. DARCHEVILLE.

Question :

Comment expliquez-vous des coefficients d'utilisation des engrais potassiques supérieurs à 100 p. 100 sur pommes de terre (tableau 7 de votre texte) ?

Pr A. AMBERGER.

Answer :

It is a matter of calculation only : If you substract the K uptake of K_0 from NPK and put it against the applied K fertilizer rate, you will get an utilization rate of the fertilizer K of more than 100 p. 100 in case of potatoes ; the rest comes from the soil. In case of barley, however, the difference in the K uptake between NPK and K_0 is lower than the K fertilization rate, therefore the utilization of fertilizer K is not higher than about 33 p. 100 (table 7).

A. COTTENIE.

Question :

Vos résultats semblent indiquer une intensité nutritive potassique égale pour une capacité nutritive différente. Est-ce que dans ces conditions la plante est plus sensible et possède-t-elle un pouvoir de discrimination meilleur que celui des méthodes chimiques d'analyse du sol ?

R. A. AMBERGER.

Answer :

I absolutely agree with you. The different crops are more sensitive and have a better ability for discrimination the actual K flow from the soil than chemical tests will do. Thus our present soil investigations cannot replace the field trials and can hardly explain the results of plant experiments.

M. P. CESCAS :

Observations sur les règles à suivre pour l'établissement d'essais de longue durée :

— avoir des parcelles de grandeur suffisante afin qu'il soit possible d'introduire de nouveaux traitements ultérieurement ;

— avoir des répétitions pour chaque traitement ;

— utiliser si possible des protocoles expérimentaux modernes ;

— conserver des échantillons des sols, des récoltes, etc., ainsi que des échantillons de tous les produits utilisés pour les traitements ;

— garder des quantités suffisantes d'échantillons en vue d'analyses ultérieures pour de futurs chercheurs ;

— introduire toujours les méthodes d'analyses les plus courantes à fin de comparaison.

3e SÉANCE — 3rd SESSION

COMMUNICATIONS SUR LES ESSAIS DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE INTÉRESSANT LES ROTATIONS DE CULTURE

PAPERS ON LONG-TERM FERTILISATION TRIALS CONCERNING CROP ROTATIONS

Président de séance : Pr A. Dam Kofoed

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 703-719.

EFFETS DE LA FUMURE SUR LES RENDEMENTS ET L'ABSORPTION DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX PAR LES CULTURES DANS L'ESSAI A LONG TERME DU CHAMP « E » DE GÖTTINGEN

F. TIMMERMANN et E. WELTE

Institut de Chimie Agricole de l'Université de Göttingen,
Von-Siebold-Strasse 6,
3400 Göttingen
République Fédérale d'Allemagne

RÉSUMÉ

En 1873, Dreschler commença une expérience située au champ « E » de l'Institut Agronomique de Göttingen, dans le but d'étudier les effets à long terme de la fertilisation minérale NPK. Bien que les rendements des parcelles NPK aient varié au cours des années, à cause des insectes, des maladies et des différentes conditions climatiques, il n'y eut aucun indice d'une certaine diminution de la fertilité du sol après la longue période de 80 ans. Les rendements des parcelles non fertilisées se sont situés à environ la moitié de ceux observés avec les traitements NPK. La fertilisation phosphatée n'eut aucun effet à cause de la teneur élevée du sol en P total et en P assimilable. Le principal facteur responsable de l'augmentation des rendements des céréales a été la fertilisation azotée, alors que le potassium a pris le rôle dominant pour les légumineuses, L'accroissement des rendements des plantes à tubercules et des plantes racines (pommes de terre et betteraves fourragères) a été réalisé essentiellement par la combinaison des fertilisations azotée et potassique. La réponse à la fertilisation azotée s'est maintenue au même niveau pendant les soixante dernières années. Les effets du traitement potassique ont augmenté dans la seconde moitié de l'expérience indiquant l'important appauvrissement en potassium des parcelles non fertilisées en potassium.

L'influence de la fertilisation sur l'absorption des éléments nutritifs par les plantes a été évidente dans la teneur en potassium de la paille. L'absorption de l'azote et du phosphore par les plantes a dépendu plus des conditions climatiques que de la fertilisation. De grands écarts de rendements entre les années, dus principalement à différentes conditions climatiques, aux insectes et aux maladies, ont été observés. C'est pourquoi, dans certains cas, il a fallu s'écarter du plan d'origine et introduire d'autres cultures dans la rotation.

DISPOSITIF, ROTATION ET FUMURE

En 1873, Drechsler mit en place au champ « E » de l'Institut pour la Culture des plantes de Göttingen un essai de fumure de longue durée comportant d'une part des traitements où manquait un élément, pour la mise en évidence de carences, et d'autre part des traitements où était testé l'effet de chaque élément séparément.

La surface en essai était divisée en huit parcelles avec les traitements suivants : « témoin », K, N, P, ainsi que KN, KP, NP et NPK (tabl. 1). Chaque parcelle avait 12,5 × 4 m, soit une surface de 50 m², et était séparée de la parcelle voisine par une bande d'isolement large de 1 m. Il n'y avait pas de répétition.

TABLEAU 1

Traitements de l'essai de longue durée du champ « E » de Göttingen

1. Fumure K	5. Témoin sans fumure
2. Fumure N	6. Fumure KN
3. Fumure P	7. Fumure KP
4. Fumure KNP	8. Fumure NP

A l'origine, l'essai comportait neuf bandes dont quatre étaient cultivées en pomme de terre, avoine, petits pois et seigle en monoculture permanente ; quatre autres bandes portaient ces mêmes cultures en rotation (tabl. 2). Sur la neuvième bande les cultures étaient toutes présentes chaque année et cultivées en assolement.

De cette manière, il devenait possible de comparer, pour chaque culture, l'effet de la monoculture et de la rotation. Par suite de fortes attaques de nématodes, les petits pois et l'avoine disparaissaient rapidement en monoculture ; c'est pourquoi dès 1897, on passa sur l'essai entier à un assolement à neuf soles comprenant petits pois, seigle, féverole, blé d'hiver, betterave fourragère, orge, haricots, pomme de terre et blé de printemps. A partir de 1923, la culture du blé d'hiver fut supprimée à la suite d'une réduction de surface due à la construction d'un nouvel institut. L'intensité des attaques de nématodes et l'apparition d'autres maladies entraînèrent en 1936 le remplacement des petits pois par du colza, et en 1941 le remplacement de celui-ci par de l'œillette. L'urbanisation des environs immédiats du champ d'essai fut à l'origine de grands dégâts de moineaux, de sorte qu'à partir de 1949, le blé de printemps a dû être remplacé par du maïs. La rotation des huit cultures (œillette, seigle, féverole, pomme de terre, maïs, haricots, betterave fourragère, orge) resta en place jusque dans les années 50, lorsque le terrain devint indispensable à l'extension de l'Université.

TABLEAU 2

Rotations de l'essai de longue durée au champ « E » de Göttingen

a) A l'installation de l'essai (DRECHSLER, 1873) :
1. pomme de terre ; 2. avoine ; 3. petits pois ; 4. seigle ; de plus, les mêmes espèces en monoculture.

b) A partir de 1897 (VON SEELHORST) :
1. petits pois ; 2. seigle ; 3. féverole ; 4. blé d'hiver ; 5. betterave fourragère ; 6. orge ; 7. haricots ; 8. pomme de terre ; 9. blé de printemps.

c) A partir de 1923 (VON SEELHORST) :
1. petits pois (à partir de 1936 colza ; à partir de 1941 œillette) ; 2. seigle ; 3. féverole ; 4. pomme de terre ; 5. blé de printemps (à partir de 1949 maïs) ; 6. haricots ; 7. betterave fourragère ; 8. orge.

TABLEAU 3

Doses annuelles d'éléments minéraux (kg/ha) *et formes des engrais de l'essai de longue durée au champ « E » de Göttingen*

Période	Élément	Forme	Céréale	Légumineuses	Cultures sarclées et oléagineuses
1878-1906	K_2O	Potasse (carbonate)	408	408	408
	N	Nitrate du Chili	46	46	46
	P_2O_5	Phosphate précipité	108	108	108
1907-1916	K_2O	Potasse (carbonate)	68	136	136
	N	Nitrate du Chili	31	31	62
	P_2O_5	Superphosphate	36	36	36
1917-1927	K_2O	Chlorure 40 p. 100	80	80	100
	N	Sulfate d'ammoniaque	40	40	40
	P_2O_5	Superphosphate	36	36	36
A partir de 1928	K_2O	Chlorure 50 p. 100	150	200	200
	N	Nitrate de Leuna (nitro-sulfate d'ammoniaque) Ca-ammonitrate	50	50	80
	P_2O_5	Superphosphate	36	54	54

La dose et la forme des engrais varièrent plusieurs fois au cours de l'expérience (tabl. 3). Au cours de la première période à dominante phospho-potassique les éléments minéraux furent apportés sous forme de potasse (carbonate), de nitrate du Chili et de phosphate précipité. Entre 1907 et 1916, les doses de potasse et de phosphate furent fortement réduites et la fumure azotée augmentée sur plantes sarclées et oléagineux. P était utilisé sous forme de superphosphate. A partir de 1917 et à nouveau à partir de 1928, la dose d'apport des engrais azotés et potassiques fut augmentée. A la place du carbonate de potassium, on employa du chlorure à 40, puis à 50 p. 100 K_2O. L'azote fut d'abord apporté sous forme de sulfate d'ammoniaque, puis sous forme de nitrate de Leuna (nitro-sulfate d'ammoniaque) et dès 1949 d'ammonitrate de calcium (TORNAU, 1959).

CONDITIONS ÉCOLOGIQUES ET PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DU SOL

Göttingen se trouve à l'extrémité méridionale de la région climatique maritime, typique du Nord de l'Allemagne, avec une pluviométrie moyenne de 616 mm, dont 270 mm en hiver, d'octobre à mars, et 346 mm durant la période de végétation. La température annuelle est de 8,2°C et présente peu de fluctuations. Les conditions climatiques conviennent à une bonne croissance des végétaux. Des années sèches avec moins de 500 mm de pluie (< 250 mm en été) ainsi que des années humides avec plus de 750 mm (> 500 mm pendant la période de végétation) n'apparaissent qu'une fois par décennie.

TABLEAU 4

Analyse physique du sol du champ « E » de Göttingen (VON REICHENBACH, 1957), *en p. 100 de sol séché à l'air*

Parcelle	Sable grossier (2 — 0,2 mm)	Sable fin (200 — 20 μ)	Limon (20 — 2 μ)	Argile (< 2 μ)
K	4,4	50,3	23,1	21,2
N	4,2	51,5	23,2	21,1
P	5,5	49,7	23,3	20,5
KNP	4,2	50,8	23,1	20,9
O	4,0	52,3	22,6	20,1
KN	4,1	52,3	21,4	21,2
KP	4,4	51,1	21,6	21,9
NP	5,7	50,1	22,0	21,2
Valeur moyenne	4,5	51,0	22,4	21,0
m	0,3	0,5	0,3	0,2

Quant à la nature du sol en expérimentation, il s'agit d'un loess limoneux sans cailloux remanié par les crues de la « Leine », qui, par suite de l'approfondissement du lit de la rivière, s'est retrouvé à 8 m au-dessus du niveau moyen actuel. La couche superficielle de loess pur se transforme en un loess argileux alluvionnaire qui, à environ 4 m de profondeur, repose par l'intermédiaire d'un banc de 0,6 à 1 m de graviers diluviens sur une argile du Keuper dans laquelle on trouve la nappe phréatique. L'analyse granulométrique de la couche arable de 30 cm (VON REICHENBACH, 1957) a montré l'homogénéité de la composition physique des parcelles (tabl. 4). De même la réaction des terres est très voisine pour les différents traitements après 80 années de fumure différenciée (tabl. 5). La teneur en carbonate varie entre 4 et 5 p. 100 de Ca CO_3 libre.

Une comparaison des teneurs en humus et des rapports C/N entre parcelles n'a pas montré de différences significatives en rapport avec la nature de la fertilisation (tabl. 6). Les différents résultats d'analyse des sols en phosphore soulignent

TABLEAU 5

Réaction du sol du champ « E » de Göttingen (VON REICHENBACH, 1957)

Parcelle	pH (KCl)
K	6,76
N	6,73
P	6,77
KNP	6,82
O	6,80
KN	6,90
KP	6,95
NP	6,85

l'excellent approvisionnement, au départ, du sol en P (tabl. 7). Une augmentation des valeurs initiales par la fumure phosphatée n'a été constatée que pour les traitements P et KNP ; NP présente des valeurs particulièrement basses.

TABLEAU 6

Teneur en humus (en p. 100 de sol séché à l'air) *des parcelles du champ « E » de Göttingen*

Parcelles	K	N	P	KNP	O	KN	KP	NP
1899 (Behn)	2,05	2,05	2,05	2,02	2,02	2,06	1,96	2,00
1920 (Behrisch)	2,01	2,00	2,01	2,04	2,04	2,01	1,90	1,99
1954 (von Reichenbach)	2,40	2,25	2,12	2,02	2,02	2,03	1,95	2,22
Rapport C/N des parcelles du champ « E » de Göttingen								
1899 (Behn)	10,8	10,1	11,7	10,8	10,6	10,6	10,7	11,6
1920 (Behrisch)	10,1	10,1	10,3	10,4	10,9	11,0	11,2	11,4
1954 (von Reichenbach)	13,1	13,2	12,1	11,8	12,3	12,6	12,6	13,6

TABLEAU 7

Teneur en P des parcelles du champ « E » de Göttingen, en mg P_2O_5/100 g de terre

Traitements	K	N	P	KNP	O	KN	KP	NP	Ø Sans apport de P	Ø Avec apport de P
Extraction à l'acide chlorhydrique à 10 p. 100										
1941	371	415	453	452	380	384	403	258	388	392
Solubilité au lactate										
1941 (0 — 20 cm de profondeur)	150	166	210	210	158	143	120	80	154	155
Méthode des plantules d'après Neubauer										
Mars 1941 (10 — 15 cm de profondeur)	13,5	7,2	7,0	10,6	10,7	10,4	12,1	—	10,5	9,9
Juin 1951 (10 — 15 cm de profondeur)	14,8	10,8	14,4	14,1	12,7	12,4	16,8	10,3	12,7	13,9

Si les teneurs des différentes parcelles en potassium total sont restées assez comparables après 80 années d'expérimentation (tabl. 8), la teneur en potassium soluble au lactate et les valeurs Neubauer témoignent d'un degré d'épuisement important des traitements sans K.

TABLEAU 8

Teneur en K des parcelles du champ « E » de Göttingen

Traitements	K	N	P	KNP	O	KN	KP	NP	Ø Sans apport de K	Ø Avec apport de K
K total en p. 100, extraction à l'acide fluorhydrique										
1956 (von Reichenbach)	1,88	1,80	1,81	1,89	1,86	1,88	1,94	1,78	1,81	1,90
K soluble au lactate, en mg/100 g de terre										
1956 (von Reichenbach)	43,8	7,6	8,3	23,9	8,8	32,0	43,1	8,0	8,2	35,7
Méthode des plantules, d'après Neubauer, en mg K/100 g de terre										
1951 (10 — 15 cm)	37,1	13,3	17,9	33,7	14,9	33,1	37,2	14,8	15,2	35,3

ÉVOLUTION DES RENDEMENTS

Un premier aperçu de l'évolution des rendements au cours d'une période d'essai de 60 ans (1893-1953) est donné par la comparaison des rendements moyens du témoin sans engrais et de ceux du traitement KNP (fig. 1). La durée choisie des périodes successives, de huit ou de cinq ans, s'avéra judicieuse du fait des changements déjà mentionnés de doses et de formes des engrais, de culture et partiellement

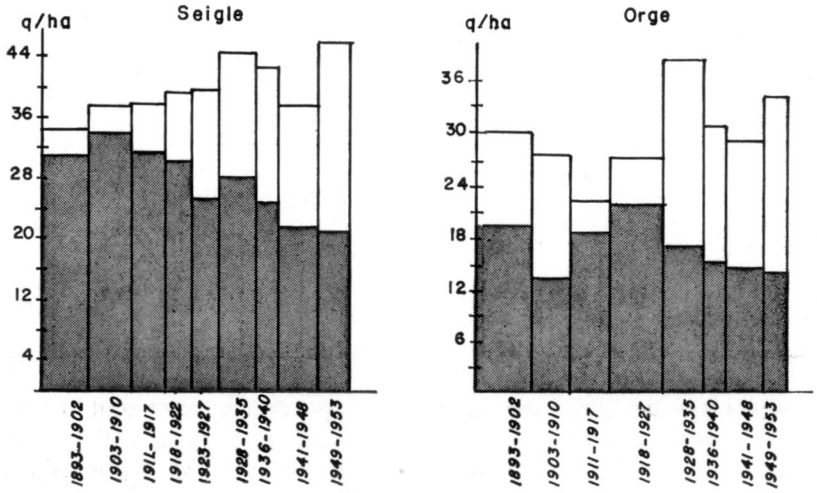


Fig. 1

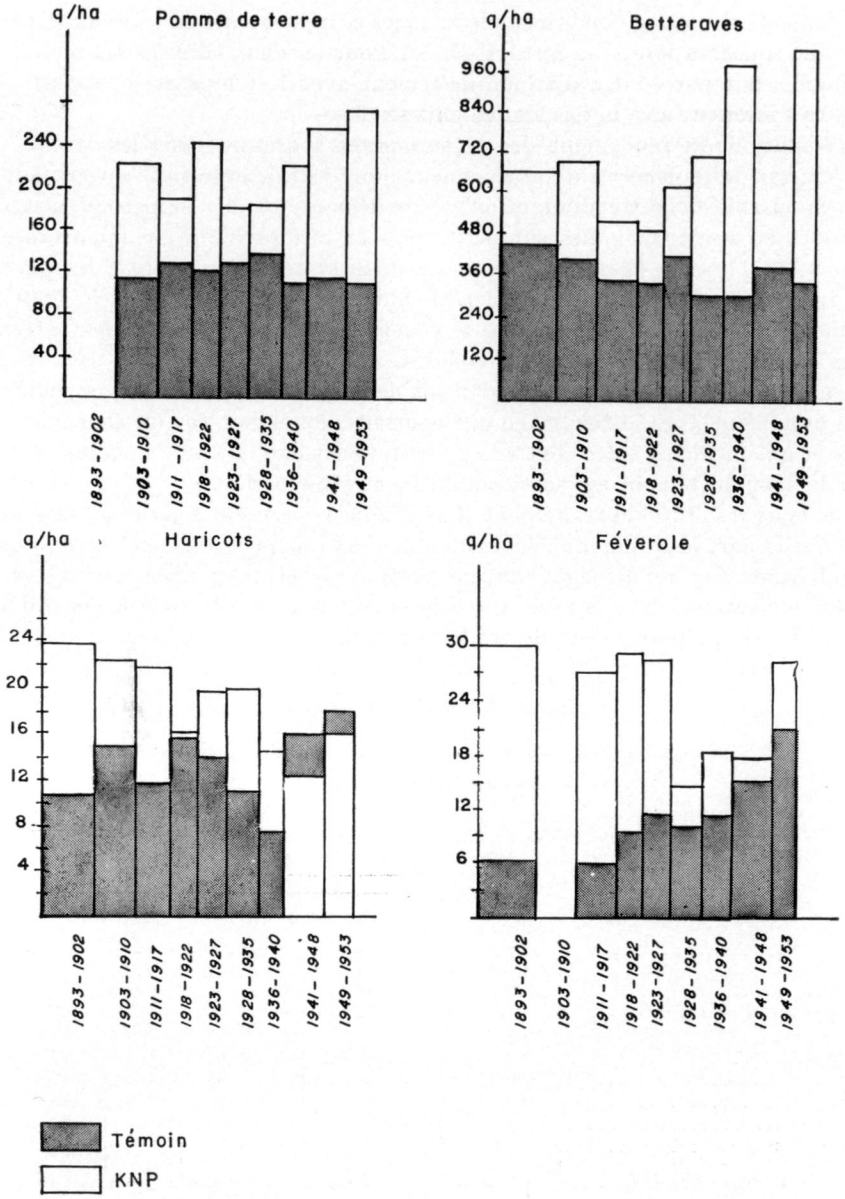


FIG. 1. — *Évolution des rendements* (en grains, tubercules et racines de betteraves) *de 1893 à 1953* (moyennes de 8 ou 5 ans) *pour la parcelle non fertilisée et pour la parcelle KNP de l'essai de longue durée mis en place au champ « E » de Göttingen, en q/ha de produits séchés à l'air.*

de variété. Les rendements moyens se rapportent à des périodes de temps de durée variable, mais comparables par ailleurs.

Les cultures céréalières, et particulièrement le seigle mais aussi l'orge, montrent dans le traitement KNP un niveau de rendement relativement constant pendant toute la durée de l'expérimentation. On peut en déduire, en négligeant les variations

de rendements dues aux conditions climatiques extrêmes, que ce traitement permet une bonne conservation de la fertilité du sol. Pour les deux céréales, les rendements des témoins ont par contre diminué nettement avec le temps et se situent à un niveau très inférieur à celui des traitements fertilisés.

L'évolution du rendement des légumineuses à graines dans les traitements KNP pourrait faire penser à un abaissement progressif de la fertilité du sol. TORNAU rend responsable de cette diminution de rendement un développement accru des nématodes et autres maladies sur petits pois et une prolifération importante des pucerons sur féverole (TORNAU, 1959). La lutte systématique contre les pucerons entre 1949 et 1953 a permis de freiner la chute des rendements de la féverole. Les rendements des témoins sans engrais se situent comme pour les céréales nettement en dessous de ceux des traitements fertilisés.

Pour les plantes sarclées, le rendement de la parcelle « fertilisée » augmente par contre nettement avec le temps, ce qui pourrait s'expliquer par un changement de variété et une meilleure lutte contre la pourriture des feuilles chez la pomme de terre. Le rendement du témoin est aussi notablement plus faible.

Les bons résultats du traitement K N P nous conduisent à poser la question de savoir quelle part les différents éléments minéraux ont pu avoir à cet accroissement de rendement. Les rendements moyens entre 1892 et 1953 nous fournissent une première indication ; dans le tableau 9 figurent les rendements relatifs des différents traitements par rapport à ceux du traitement K N P.

TABLEAU 9

Rendements relatifs moyens du champ « E » de Göttingen 1892-1953
(fumure KNP = 100)

	Parcelles							
	K	N	P	KNP	O	KN	KP	NP
Seigle	85	97	87	100	81	97	81	94
Blé de printemps	69	94	71	100	70	96	69	88
Orge	64	94	54	100	56	100	59	92
Petits pois	85	71	61	100	62	104	92	80
Haricots	100	51	49	100	55	102	89	55
Féverole	109	30	36	100	38	103	106	42
Pomme de terre	68	69	56	100	59	96	66	71
Betterave fourragère	71	77	55	100	56	98	66	76

Ces données permettent de mieux connaître les besoins en éléments minéraux des différentes espèces cultivées et les équilibres minéraux du sol.

La comparaison du traitement P avec le témoin, de PK avec K, de NP avec N et de KNP avec KN montre, pour toutes les cultures, une absence de réponse à la fumure phosphatée et confirme ainsi les résultats de l'analyse chimique qui indiquent une bonne richesse en P du champ « E » de Göttingen.

Chez les céréales et surtout le seigle, l'effet de la fumure potassique est faible.

La part essentielle à l'augmentation de rendement des céréales revient à la fumure azotée. L'action du potassium, est par contre, nettement prépondérante pour les légumineuses. Seuls les petits pois réagissent aussi à la fumure azotée avec une augmentation de rendement par rapport au témoin ; on trouve le maximum de rendement pour le traitement KN.

La pomme de terre et la betterave fourragère réagissent à la fumure de façon assez semblable. Le traitement KN est le plus favorable. Apportés seuls, l'un et l'autre des deux éléments ne provoquent qu'une augmentation limitée de rendement.

Pour connaître plus qu'une tendance générale de l'effet des engrais azotés et avoir une idée sur l'évolution des réponses au cours de 60 années d'expérimentation, il est utile de comparer, pour les périodes de temps choisies, les rendements de deux cultures (tabl. 10).

TABLEAU 10

Action de la fumure azotée dans l'essai de longue durée au champ « E » de Göttingen
Traitements sans N = 100

	Seigle				
	N : O	NK : K	NP : P	NKP : KP	± ∅ 100
1892-1902	103	106	97	113	5
1903-1910	104	101	105	104	4
1911-1917	105	104	96	111	4
1918-1922	112	110	91	110	6
1923-1927	125	116	101	124	17
1928-1935	114	110	101	115	10
1936-1940	137	125	125	135	31
1941-1948	160	138	135	156	47
1949-1953	158	136	141	189	56
1892-1953	124	116	110	129	20
	Betterave fourragère				
1892-1902	146	131	134	139	38
1903-1910	160	142	137	153	48
1911-1917	163	146	170	156	59
1918-1922	176	144	173	153	62
1923-1927	119	138	147	139	36
1928-1935	112	139	135	166	38
1936-1940	139	133	141	160	43
1941-1948	111	137	124	150	31
1949-1953	120	138	126	151	34
1892-1953	138	139	143	152	43

La comparaison des rendements relatifs des différents traitements montre une efficacité croissante de la fumure azotée au cours des trente dernières années. Le changement de précédent cultural — en 1936, le colza remplace les petits pois et cède lui-même sa place à l'œillette après 1941 — et le choix de la variété de seigle *Petkus* plus résistante à la verse, devraient être les principales raisons de l'augmentation de l'efficacité de la fumure azotée.

L'action de l'azote sur betterave fourragère a par contre été assez constante dans le temps, malgré des irrégularités de rendement dues aux conditions climatiques. Ce résultat montre bien que la fertilité du sol a pu être maintenue pendant les 60 années d'expérimentation grâce à la fumure KNP.

La moyenne des réponses des autres cultures à l'azote met surtout en évidence les besoins importants en N du blé, de l'orge et de la pomme de terre (tabl. 11). Haricot et féverole réagissent peu ou même de façon négative à l'apport d'azote. Pour le blé et l'orge, l'efficacité de N augmente alors qu'elle reste relativement constante pour la pomme de terre.

TABLEAU 11

Effet moyen de N par comparaison des parcelles avec et sans fumure azotée, en p. 100

	Blé	Orge	Petits pois	Haricots	Féverole	Pomme de terre
1892-1902	29	16	16	19	—	19
1903-1910	27	111	18	18	14	40
1911-1917	29	53	9	10	1	38
1918-1922	29	41	13	0	— 16	34
1923-1927	49		35	— 6	7	41
1928-1935	33	56	31	0	— 9	33
1936-1940	63	78	—	3	12	48
1941-1948	90	75	—	— 16	— 1	50
1949-1953	—	98	—	5	— 13	43

TABLEAU 12

Effet moyen de K par comparaison des parcelles avec et sans fumure potassique en p. 100

	Seigle	Blé de printemps	Orge	Petits pois
1892-1902	— 3	2	1	26
1903-1910	1	2	14	36
1911-1917	4	4	11	43
1918-1922	3	11	11	71
1923-1927	7	6	11	94
1928-1935	4	5	11	32
1936-1940	4	1	16	—
1941-1948	0	— 4	16	—
1949-1953	— 3	—	7	—
	Haricots	**Féverole**	**Pomme de terre**	**Betterave fourragère**
1892-1902	91	—	27	10
1903-1910	64	269	40	11
1911-1917	97	412	32	13
1918-1922	66	268	32	16
1923-1927	79	182	(11)	22
1928-1935	114	327	—	64
1936-1940	237	206	47	52
1941-1948	143	147	35	33
1949-1953	80	55	51	43

L'effet du potassium est mis en évidence de façon analogue dans le tableau 12 ; on y trouve la preuve du besoin important des légumineuses et des plantes sarclées en cet élément. Son efficacité croissante est en accord avec l'épuisement de plus en plus poussé des parcelles sans potasse.

Dans ce sol riche en P, la réponse au phosphore a tendance en partie à être négative (tabl. 13). Seule la féverole réagit positivement. On admet que l'effet partiel-

TABLEAU 13

Effet moyen de P par comparaison des parcelles avec et sans fumure phosphatée, en p. 100

	Seigle	Blé de printemps	Orge	Petits pois
1892-1902	+ 6	— 1	— 5	+ 4
1903-1910	— 3	0	— 4	— 4
1911-1917	— 2	+ 2	— 6	+ 7
1918-1922	— 1	— 3	— 3	— 2
1923-1927	+ 2	— 4	— 3	+ 16
1928-1935	+ 1	— 2	0	+ 13
1936-1940	0	+ 3	— 1	—
1941-1948	+ 1	— 1	— 6	—
1949-1953	— 2	—	0	—
	Haricots	**Féverole**	**Pomme de terre**	**Betterave fourragère**
1892-1902	— 3	—	— 2	— 5
1903-1910	— 2	+ 12	0	— 5
1911-1917	— 3	+ 12	— 1	— 2
1918-1922	— 5	0	+ 4	+ 3
1923-1927	— 2	+ 5	+ 6	+ 3
1928-1935	— 7	+ 25	+ 6	+ 1
1936-1940	+ 6	+ 23	— 2	— 3
1941-1948	+ 7	+ 4	— 2	— 2
1949-1953	— 5	+ 5	— 2	0

TABLEAU 14

Rapport grain/paille ou racines/feuilles des récoltes du champ « E » de Göttingen
(grain/paille ou racines/feuilles = 1/ *x*)

	Avec N	Sans N	Avec K	Sans K	Avec P	Sans P
Seigle de Göttingen (1900-1935)	2,32	2,21	2,29	2,15	2,20	2,24
Seigle *Petkus* (1936-1953)	1,76	1,85	1,88	1,73	1,80	1,81
Orge (1892-1953)	1,59	1,68	1,66	1,58	1,65	1,59
Blé de printemps (1900-1948)	2,26	2,09	2,25	2,08	2,18	2,18
Betterave fourragère (1928-1953)	0,32	0,30	0,28	0,34	0,31	0,31

lement négatif de P pourrait être dû à une fumure phosphatée excessive provoquant un raccourcissement de la période de végétation (LIEBSCHER, 1895 ; VON SEELHORST, 1905).

Suivant les espèces et les variétés de céréales, la fumure a une action variable sur le rapport grain/paille (tabl. 14). Le seigle « Staudenroggen de Göttingen » cultivé jusqu'en 1935 après le précédent cultural petits pois, ne réagit qu'à la fumure potassique par une augmentation du rapport grain/paille. Cet effet défavorable du potassium se manifeste aussi avec la variété *Petkus* pour laquelle la fumure azotée provoque une diminution du rapport grain/paille. Sur orge cultivée après betterave fourragère, les fumures potassique et phosphatée diminuent le rapport grain/paille alors que la fumure azotée l'augmente. L'apport d'azote et celui de potasse provoquent chez le blé de printemps un développement relativement plus important de la paille.

En ce qui concerne le rapport racine/feuilles de la betterave fourragère, on observe uniquement un effet légèrement favorable de la fumure potassique sur le développement des racines.

PRÉLÈVEMENTS ET TENEURS DES PLANTES EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX

Depuis très longtemps déjà, en partant des résultats d'analyses des récoltes, on a essayé de répondre à la question de savoir si la teneur en éléments minéraux des plantes pouvait nous renseigner sur les besoins en engrais du sol. Les analyses du grain et de la paille d'orge effectuées entre 1896 et 1899 montrent que, seul, l'apport de potasse a provoqué, par rapport aux traitements sans K, une augmentation des teneurs moyennes de la paille en cet élément (tabl. 15). Pour les autres traitements, les teneurs en éléments minéraux ne sont pas significativement différents entre parcelles « avec » et « sans ».

TABLEAU 15

Teneurs en éléments minéraux et prélèvements de l'orge du champ « E » de Göttingen (VON SEELHORST, 1896-1899), *en p. 100 de matière sèche*

Parcelles	Grain		
	N	K_2O	P_2O_5
Fertilisées	1,76-2,18	0,57-0,73	1,02-1,11
Non fertilisées	1,74-2,21	0,59-0,73	1,03-1,20
		Paille	
Fertilisées	0,48-0,79	1,54-1,99	0,48-0,60
Non fertilisées	0,54-1,02	1,09-1,46	0,50-0,71

TABLEAU 15 (*suite*)

Valeurs extrêmes, les écarts sont donnés en p. 100 des teneurs moyennes en éléments minéraux

	Grain			Paille		
	N	K_2O	P_2O_5	N	K_2O	P_2O_5
Fumure	8,0	17,5	5,2	22,5	34,5	23,1
Conditions climatiques	29,2	12,3	24,5	63,4	2,5	39,2

Prélèvements totaux moyens par le grain et la paille, en kg/ha

Parcelles	N	K_2O	P_2O_5
Fertilisées	68,8-97,9	68,8-114,1	32,9-53,8
Non fertilisées	44,4-60,8	46,6- 73,8	38,3-56,5

En partant des teneurs moyennes en éléments minéraux, notées pendant les quatre années d'observation, et en calculant les variations dues d'une part à la fumure et d'autre part aux conditions climatiques de la saison, on observe, pour le potassium, un effet supérieur à celui du climat. Les rendements plus élevés des parcelles ayant reçu une fumure azotée et potassique sont à l'origine de prélèvements supérieurs en N et en K, compensés par la fumure minérale.

Plusieurs auteurs (BANSE, 1937 ; VON REICHENBACH, 1955 ; ROSTWOROWSKI, 1912 ; HUXDORF, 1925 ; VAN HAUTEN, 1922) trouvent des relations positives entre la teneur en K des plantes, la fumure potassique et les rendements du champ « E » de Göttingen (tabl. 16). Dans les parcelles ayant reçu de la potasse, les teneurs en K sont nettement plus élevées dans les feuilles, l'ensemble des parties aériennes et

TABLEAU 16

Teneurs en K d'organes végétaux prélevés sur le champ « E » de Göttingen, en K_2O p. 100 de la matière sèche

Pomme de terre

Traitement	Feuilles		Parties aériennes		Tubercules		
	BANSE (1935)	VON REICHENBACH (1955)	ROSTWOROWSKI (1912)	HUXDORF (1923)	ROSTW. (1912)	HUXD. (1923)	BANSE (1935)
Avec K	6,16	7,39	5,78	6,58	2,58	2,96	2,89
Sans K	1,75	1,63	1,03	1,51	1,33	1,77	1,70

TABLEAU 16 (*suite*)

Teneurs en K des feuilles et graines de haricot, comparées aux rendements en graines et en fanes

Haricot					
Traitement	Feuilles (v. Reichenbach, 1955)			Graines (van Hauten, 1933)	
	% K_2O	Rendement (q/ha)		% K_2O	Rendement (q/ha)
		Fanes	Graines		Graines
Avec K	4,32	19,5	12,8	1,85	15,2
Sans K	1,37	15,4	7,7	1,60	10,4

dans les tubercules de la pomme de terre. Les plus fortes teneurs en potasse des haricots sur les parcelles ayant reçu de la potasse se répercutent aussi sur les rendements, plus élevés.

L'excellent approvisionnement en P du champ « E » de Göttingen ne permet pas de mettre en évidence une relation entre la teneur en P des plantes et le rendement.

CONCLUSION

Dans les conditions écologiques et édaphiques favorables du champ d'essai permanent « E » de Göttingen, les rendements des traitements KNP ne permettent pas de déceler une diminution de la fertilité du sol après 80 années d'expérimentation, malgré certaines variations dues au climat et aux maladies. Dans les parcelles non fertilisées, les rendements moyens atteignent environ la moitié du niveau des parcelles KNP. La fumure phosphatée est restée généralement sans effet ; les causes en sont les réserves importantes du sol en P et sa bonne assimilabilité.

Chez les céréales les suppléments de rendement des parcelles fertilisées sont dus en premier lieu à l'azote ; chez les légumineuses l'effet de la potasse prédomine fortement et chez les plantes sarclées les deux éléments ont une part à l'augmentation de rendement. L'action de l'azote sur le rendement est sensiblement constante au cours des 60 années d'expérimentation alors que celle du potassium augmente nettement au cours de la deuxième moitié de la période expérimentale, dénotant ainsi un appauvrissement progressif des parcelles sans potasse.

L'influence de la fumure sur la teneur en éléments minéraux des plantes n'est manifeste dans le cas des céréales que pour l'apport de potasse qui augmente les teneurs en K de la paille sans modifier la composition du grain. Les teneurs en azote et en phosphore des récoltes étaient davantage sous l'influence des conditions climatiques que de la fertilisation. La même constatation a pu être faite en ce qui concerne l'effet de la fumure sur plantes sarclées et sur légumineuses. Les différences les plus remarquables se trouvent chez la pomme de terre dont les parties aériennes ont, dans les parcelles fertilisées, une teneur en potasse trois à quatre fois supérieure à

celle des parcelles non fertilisées ; la différence n'est que de 50 à 100 p. 100 pour les tubercules.

Malgré les conditions écologiques favorables, malgré la qualité du sol et un climat équilibré, les rendements varient au cours de la période d'expérimentation pour la plupart des cultures du simple à plus du double ; ceci rend difficile l'interprétation des résultats d'essai. C'est le seigle qui montre les variations de rendement les plus faibles ; pour le blé de printemps, l'orge, la pomme de terre et la betterave fourragère, elles sont déjà plus importantes. Chez les légumineuses, les rendements se révèlent les plus incertains. L'amplitude des variations n'est pas seulement due aux conditions climatiques, mais en grande partie au développement des maladies et parasites, sous la dépendance des conditions météorologiques. L'extension des maladies et parasites par suite du choix de la rotation a exigé plusieurs modifications du plan de culture initial.

Reçu pour publication en septembre 1976.

SUMMARY

EFFECTS OF FERTILIZERS ON YIELDS AND NUTRIENT UPTAKE BY CROPS IN THE LONG-TERM EXPERIMENT « GÖTTINGEN E-FIELD »

In order to study the long-term effects of NPK mineral fertilization Drechsler started in 1873 an experiment at the E-field of the Agronomy-Institute at Göttingen. Although the yields of the NPK-fertilized plots fluctuated because of pests, diseases, and different weather conditions in the years, after the long period of 80 years there was no indication of a certain decrease in soil fertility. The yields of the unfertilized plots ranked about one half of the NPK-treatments. Because of the high content of total and plant available phosphorus in the soil there were no effects of P-fertilization. The main factor for increasing yields of cereals was nitrogen fertilizer, whereas in the case of legumes potassium took this outstanding role. Increasing yields of tuber and root crops (potatoes and fodder beets) were effected primarily by combination of nitrogen and potassium fertilization. The response of nitrogen fertilization remained during the period of the last 60 years on the same level. The effects of potassium treatment increased in the second half of the experimental period indicating the strong potassium exhaustion of the K-unfertilized plots. The effect of fertilization on plant nutrient uptake was evident in potassium content of the straw. Nitrogen and phosphorus uptake of the plants depended more than weather conditions than fertilization. There were found great deviations of yields between the years due principally to different weather conditions, pests and diseases. In some cases therefore one must diverge from the original plan and take other crops in the rotation.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG DER DÜNGUNG AUF DEN ERTRAG UND DAS ABSORBIEREN DER MINERALELEMENTE DURCH DIE KULTUREN IM LANGZEITVERSUCH DES FELDES E IN GÖTTINGEN

Im Jahre 1873 legte Drechsler auf dem Versuchsfeld E des Göttinger Pflanzenbauinstitutes einen Düngungsversuch an, um die Langzeitwirkung einer mineralischen NPK-Düngung zu prüfen. Unter den günstigen Standort- und Bodenbedingungen des Versuchsfeldes liessen die Erträge der NPK-gedüngten Varianten, auch nach 80 jähriger Versuchsdauer von witterungs- und krankheitsbedingten Schwankungen abgesehen, kein Nachlassen der Bodenfruchtbarkeit

erkennen. Die ungedüngten Teilstücke erbrachten im Durchschnitt nur die Hälfte des Ertrages der NPK-gedüngten Variante. Aufgrund des grossen P-Bodenvorrates und der guten-Verfügbarkeit blieb die P-Düngung durchweg wirkungslos. Bei den Getreidearten wurden die Mehrerträge der gedüngten Varianten gegenüber ungedüngt in erster Linie durch den Stickstoff bewirkt, bei den Hülsenfrüchten trat die Kaliwirkung einseitig hervor und in den Mehrerträgen der Hackfrüchte erwiesen sich beide Nährstoffe gleichermassen wirksam. Die Ertragswirkung des Stickstoffs hielt sich im Verlauf der letzten 60 Versuchsjahre ungefähr auf gleicher Höhe, der Anstieg der Kali-Düngerwirkung mit zunehmender Versuchsdauer signalisiert die zunehmende K-Verarmung der ungedüngten Varianten. Die Erträge der meisten im Versuch angebauten Pflanzen schwankten witterungs- und krankheitsbedingt um mehr als das Doppelte. Fruchtfolgebedingte Krankheits- und Schädlingsausbreitung machten mehrmalige Abänderungen des ursprünglichen Anbauplans erforderlich. Ein Düngungseinfluss aud die Nährstoffgehalte der Pflanzen war insbesondere für das Kalium festzustellen. Die Stickstoff- und Phosphatgehalte des Erntematerials wurden durch die Jahreswitterungsunterschiede weit stärker beeinflusst als durch die Düngung.

РЕЗЮМЕ

Влияние удобрений на урожайность и поглощение питательных элементов культурами в долгосрочных опытах « поле Е» в Геттингене.

Ф. ТИММЕРМАН, Е. ВЕЛЬТЕ.

В 1873-м году Дрешлер заложил опыт расположенный на « поле Е» Сельскохозяйственного Института в Геттингене, с целью изучения долгосрочного действия минерального удобрения NPK. Несмотря на некоторую разницу отмеченную в урожайности делянок NPK в течении разных лет и вызванную насекомыми, болезнями и разными климатическими условиями, не было отмечено никаких признаков уменьшения плодородия почвы в течении 80-тилетнего периода. Урожайность делянок без удобрения находилась на уровне приблизительно половины урожайности наблюдавшейся на делянках получавших удобрение NPK. Фосфорные удобрения были наименее эффективными из за повышенного содержания общего и усвояемого фосфора в почве.

Главным фактором увеличения урожайности злаков являлись азотные удобрения, в то время как калий играл главную роль для бобовых. Увеличение-же урожайности клубеньковых растений и корнеплодов (картофель и кормовая свекла) получалось главным образом при помощи комбинаций азотных и калийных удобрений. Действие азотных удобрений оставалось на одном и том-же уровне в течении последних 60-ти лет. Эффективность калийных удобрений, наоборот, увеличилась во второй половине опыта, что указывает на сильное обеднение этим элементом делянок его не получавших.

Влияние удобрения на поглощение питательных элементов растениями было несомненным в случае валия (содержание этого элемента в соломе). Поглощение азота и фосфора зависело больше от климатических условий, чем от самого удобрения. Как уже было указано, наблюдавшиеся крупные различия урожайности в различные годы, об'ясняются разницей в климатических условиях и повреждениями вызванными насекомыми и болезнями. И, поэтому, в некоторых случаях, приходилось отклоняться от первоначального плана и вводить новые культуры в севооборот.

RÉFÉRENCS BIBLIOGRAPHIQUES

BANSE B., 1937. *Über den Einfluss einseitiger Düngerwirkungen auf die Kartoffelpflanze.* Diss., Landw. Fak. Univ. Göttingen.

BEHRISCH F., 1922. *Chemische Untersuchungen über die Nährstoffverhältnisse des Göttinger E-Feldes.* Diss. Univ. Göttingen.

HUXDORFF W., 1925. Untersuchungen über Entwicklung und Zusammensetzung der Kartoffel unter dem Einfluss verschiedener Düngung. *J. Landw.*, **73**, 177.

LIEBSCHER G., 1895. Untersuchungen über die Bestimmung des Düngerbedürfnisses der Ackerböden und Kulturpflanzen. *J. Landw.*, **43**, 285.

REICHENBACH GRAF VON H., 1955. *Ertragsbildung und Mineralstoffzusammensetzung verschiedener Kulturpflanzen in ihrer Beziehung zum Nährstoffzustand des Göttinger E-Feldes.* Diplomarbeit, Landw. Fak. Univ. Göttingen.

REICHENBACH GRAF VON H., 1957. *Untersuchungen über Verteilung und Dynamik des Kaliums im Boden des Göttinger E-Feldes.* Diss. Landw. Fak. Univ. Göttingen.

ROSTWOROWSKI GRAF S., 1912. Studien über die Wirkung langjähriger einseitiger Düngung auf Pflanzen und Boden. *J. Landw.*, **60**, 371.

SEELHORST VON C., 1905. Beobachtungen über Düngung auf Grund der im letzten Jahrzehnt auf dem E-Feld gemachten Erfabrungen. *J. Landw.*, **53**, 29.

TORNAU O., 1959. *Der Düngungsversuch des Göttinger E-Feldes.* Ein Sammelbericht. Göttingen.

VAN HAUTEN A., 1922. Einwirkung verschiedener Düngemittel auf Vietsbohnen. *J. Landw.*, **70**, 1.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 721-742.

FERTILITÉ DU SOL ET BILAN DE L'AZOTE DANS L'ESSAI PERMANENT DE FUMURE « EWIGER ROGGENBAU » (CULTURE CONTINUE DE SEIGLE) A HALLE/SAALE

E. WELTE et F. TIMMERMANN

Institut de Chimie agricole de l'Université de Göttingen,
Von-Siebold-Strasse 6,
D 3400 Göttingen
République Fédérale d'Allemagne

RÉSUMÉ

Cet exposé présente les conceptions diverses et les interprétations des résultats de l'essai permanent « Ewiger Roggenbau » établi en 1878 à Halle/Saale. Il est consacré plus particulièrement à la question de l'évolution de l'humus et des modifications des quote-parts de minéralisation dépendant de la fumure ou du temps sur les trois parcelles : fumure au fumier d'étable, fumure NPK et sans fumure. Les résultats suivants ont été obtenus :

1. Pour évaluer la tendance de l'évolution des récoltes, les expressions mathématiques les plus convenables sont celles qui tiennent compte de la dynamique des processus biologiques, c'est-à-dire dans le cas de la « Ewiger Roggenbau », celles qui permettent le rapprochement asymptotique à la position d'équilibre correspondant au système d'exploitation.

2. En ce qui concerne les analyses de C et N du sol, qui sont insuffisantes et faites dans des espaces de temps irréguliers, des calculs de tendance sont également possibles et admissibles, si le rapport C/N est considéré comme quasi-constant sur la durée d'essai. Des expériences pédologiques justifient cette constatation. A ce propos, on peut attribuer à la détermination du C une plus grande certitude qu'à celle de l'N par la méthode Kjeldahl, qui donne des valeurs trop basses dans le cas où la réduction de l'azote oxydé est insuffisante.

3. Le niveau d'humus dans la parcelle NPK est resté inchangé au cours des soixante-quinze ans de la durée d'essai, si la détermination du carbone est considérée comme exacte. Sur la parcelle au fumier d'étable il s'est élevé de 2,13 p. 100 à 2,84 p. 100 au cours des quarante premières années et est resté alors invariable. Dans la parcelle non fumée, une décomposition d'humus a eu lieu d'abord dans le même temps, jusqu'à ce que le niveau d'humus de 1,94 p. 100 corresponde au nouvel équilibre.

4. Les rendements, plus faibles initialement sur la parcelle fumier par comparaison avec la parcelle NPK, peuvent être expliqués par la fixation de 900-1 000 kg/ha N due à l'augmentation de l'humus. Par contre les rendements élevés de la parcelle non fumée dans les premières années de l'essai par comparaison au niveau du rendement dans la phase d'équilibre sont à attribuer à l'azote supplémentaire venant de la décomposition de l'humus. L'approvisionnement du seigle en N dans la parcelle non fumée provient exclusivement (d'après le calcul) de sources d'N extérieures au sol.

5. Les taux de minéralisation de l'N du sol montrent des différences marquées sur les trois parcelles avec fumure. Après soixante-quinze ans, la destruction annuelle d'humus se situe à près

de 4,4 p. 100 pour la parcelle fumier ; par contre, sur la parcelle NPK, elle est de 2,0 p. 100 et pour la parcelle non fumée elle n'est plus que 1,0 p. 100. La parcelle au fumier d'étable présente ainsi le meilleur état de fertilité du sol.

Au cours des soixante-quinze ans d'essai, les cœfficients de minéralisation ont diminué sur les trois parcelles. Sur les parcelles fumier et NPK ils ont baissé de 20 p. 100, tandis que la parcelle non fumée présente une diminution de 41 p. 100.

Les trois parcelles montrent en conséquence une perte d'activité microbienne même si celle-ci se manifeste différemment, ce qui influence défavorablement la dynamique des éléments nutritifs particulièrement l'utilisation de l'azote disponible.

INTRODUCTION

D'après le modèle de l'essai de Rothamsted en Angleterre, Julius Kühn entreprit à Halle en 1878 un essai permanent de monoculture céréalière. Ce champ d'essai, désigné dans la littérature comme culture continue du seigle « Ewiger Roggenbau », devait contribuer à éclaircir la question suivante : comment la fertilité, l'état de la dynamique des éléments nutritifs, se modifient-ils dans le sol au cours des années par la culture d'une même espèce végétale ? Le choix du seigle comme plante expérimentale est motivé par son autocompatibilité et parce qu'il est moins sensible aux maladies et ennemis dans des conditions pathologiques et climatiques données. En outre, le seigle est capable d'étouffer les mauvaises herbes et est relativement peu exigeant en ce qui concerne le taux d'humus et la capacité de l'eau du sol.

L'emplacement de l'essai se trouve à l'abri de la pluie du Harz et appartient, avec ses précipitations annuelles moyennes de 500 mm, aux régions sèches de l'Allemagne (tabl. 1). La température annuelle moyenne est de 9,2°C.

TABLEAU I

Répartition des températures et des précipitations (1899-1928), *moyennes mensuelles sur trente ans pour les essais permanents «Ewiger Roggenbau »*

(culture permanente de seigle)
(d'après R. W. Böhme, 1930)

	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.
mm	37,6	32,1	32,8	30,3	22,7	27,8	36,7	55,0	54,2	74,1	57,1	43,6
(%)	7,5	6,4	6,5	6,0	4,5	5,5	7,3	10,9	10,8	14,7	11,3	8,6
	36,4 p. 100						63,6 p. 100					
°C	9,1	4,4	1,5	— 0,9	— 1,5	4,6	8,6	13,8	16,4	18,4	17,4	13,9
	Ø annuelle : 9,2°C											

Le sol du champ d'essai a été caractérisé par KÜHN comme une terre glaise diluviale avec un sous-sol homogène. Une analyse granulométrique effectuée lors de la mise en place de l'essai au moyen d'un cylindre calibré pour le prélèvement d'échantillons a donné les résultats suivants :

Diamètre des particules

2,00-0,25 mm	48,6 p. 100 de la terre fine
0,25-0,02 mm	32,5 p. 100 de la terre fine
< 0,02 mm	18,9 p. 100 de la terre fine

KÜHN a classé le sol d'après son taux de matières nutritives minérales, comme « assez riche ». Il a donné la teneur en humus au commencement de l'essai comme étant de 2,13 p. 100. Une analyse d'azote ne fut malheureusement pas effectuée à cette époque. Le sol était dans un bon état de culture et n'avait pas reçu de fumier d'étable depuis trois ans avant le commencement de l'essai.

Le champ d'essai est divisé en 5 parcelles de 1 000 m² (11,75 × 85,15 m). Les parcelles sont séparées par des murs en béton enfoncés dans le sol. Des parcelles de répétition ne furent pas prévues.

L'essai comporte les variantes suivantes avec des applications annuelles :

1° Parcelle au fumier d'étable : 120 q/ha fumier d'étable.

2° Parcelle PK : 56 kg/ha P_2O_5 (au début sous forme de superphosphate, depuis 1925 sous forme de scories Thomas), 90 kg/ha K_2O (au début sous forme de kaïnite, plus tard sous forme de sulfate de potassium).

3° Parcelle NPK : 40 kg/ha N (20 kg en automne sous forme de sulfate d'ammoniaque, 20 kg au printemps sous forme de nitrate de sodium), 56 kg/ha P_2O_5, 90 kg/ha K_2O.

4° Parcelle N : 40 kg/ha N.

5° Parcelle non fumée : sans fumure.

Les quantités d'éléments nutritifs apportées annuellement par le fumier d'étable ne furent déterminées qu'occasionnellement. En moyenne, de 1886 à 1890, elles s'élevèrent à 70 kg N, 50 kg P_2O_5, et 70 kg K_2O. Les analyses effectuées dans les années 50 ont donné, pour 120 q/ha de fumier les quantités en éléments nutritifs suivantes : 65 kg N, 45 kg P_2O_5 et 75 kg K_2O (MERKER, 1955). La fumure minérale azotée fut modifiée à partir de 1948 de manière qu'en automne, seulement 10 kg N soient donnés sous forme de sulfate d'ammoniaque et 30 kg N au printemps sous forme d'ammonitrate de calcium.

Les chaumes sont enfouis par un labour aussitôt après la récolte. Suivant les recommandations de KÜHN, on employa comme semence jusqu'en 1921 du seigle récolté sur la parcelle même. A partir de 1922, la variété locale jusqu'alors employée fut remplacée par la variété *Petkus*.

Pour les discussions suivantes sur l'évolution de la fertilité du sol et du bilan de l'azote, il faut recourir aux trois variantes : sans fumure, fumure minérale NPK et fumure au fumier, parce qu'une comparaison des résultats de ces parcelles en ce qui concerne l'humus laisse prévoir les différenciations les plus marquées.

RENDEMENTS

Au cours de l'essai permanent avec monoculture de seigle qui a maintenant près de 100 ans, les résultats ont été évalués pour des intervalles de temps différents, particulièrement l'évolution des rendements en grains et en paille. Les modifications de caractères importants du sol, spécialement des niveaux d'humus et d'azote, et surtout la productivité comparée de l'azote dans le fumier d'étable et la fumure minérale ont été envisagés dans des publications contreversées. Les rapports détaillés de KÜHN après vingt et un ans d'essai (KÜHN, 1901), de ROEMER et IHLE après quarante-trois années d'essai (ROEMER et IHLE, 1925), de SCHMALFUSS après soixante-dix ans d'essai (SCHMALFUSS, 1950) et de MERKER après soixante-quinze ans d'essai (MERKER, 1956) doivent être soulignés. En outre, des interprétations et des résultats partiels ont été discutés dans d'autres publications importantes (WEINAUG, 1921 ; BÖHME, 1930 ; SCHEFFER, 1931 ; SCHMALFUSS et KOLBE, 1961 et 1966 ; MÜLLER et REIHER, 1966 ; RAUHE et LEHNE, 1966 *a*, 1966 *b*).

L'interprétation des résultats des rendements trouvés pour les différentes variantes de fumure est restée problématique et jusqu'à présent n'a pas pu conduire à une conception harmonieuse dans le domaine scientifique, quoique l'arrangement de l'essai et la culture du seigle en monoculture offrent des conditions hautement favorables — contrairement aux essais permanents en assolement — pour obtenir des résultats univoques.

De toute façon les fluctuations des récoltes dues aux agents climatiques (particulièrement pour la paille) causaient de telles déviations que tous les efforts entrepris

TABLEAU 2 *a*

Rendements en grains du champ d'essai « Ewiger Roggenbau » à Halle/Saale de 1879 à 1953
(Moyennes sur cinq ans)
(d'après ROEMER et IHLE (1925), SCHMALFUSS (1950) et MERKER (1956))
Grain en q/ha (séché air)

Parcelle d'essai	1-5 1879-83	6-10 1884-88	11-15 1889-93	16-20 1894-98	21-25 1899-1903	26-30 1904-08	31-35 1909-13	36-40 1914-18
Fumier d'étable	28,3	27,0	23,9	27,7	26,9	25,7	25,3	20,4
NPK	31,1	29,3	28,9	29,3	26,8	24,9	23,6	18,9
Non fumée	22,8	21,7	17,6	19,7	17,2	14,1	13,8	10,9

Parcelle d'essai	41-45 1919-23	46-50 1924-28	51-55 1929-33	56-60 1934-38	61-65 1939-43	66-70 1944-48	71-75 1949-53	
Fumier d'étable	19,3	26,3	26,6	26,1	27,3	21,7	29,6	
NPK	19,5	27,4	27,0	21,7	22,1	18,4	26,8	
Non fumée	8,7	12,7	12,4	12,1	12,6	8,5	11,8	

TABLEAU 2 *b*

Rendements en paille et en balle du champ d'essai « Ewiger Roggenbau » à Halle/Saale de 1879 à 1953
(Moyennes sur dix ou cinq ans)
(d'après ROEMER et IHLE (1925), SCHMALFUSS (1950) et MERKER (1956))
Paille et balle en q/ha de récolte séchée à l'air

Parcelle d'essai	1-10 1879-1988	11-20 1889-1898	21-30 1899-1908	31-40 1909-1918	41-45 1919-1923	46-50 1924-1928
Fumier d'étable	47,2	49,0	54,6	49,6	44,0	42,8
NPK	52,8	53,8	54,5	47,3	43,4	44,1
Non fumée	37,5	35,3	29,9	26,3	19,6	18,1

Parcelle d'essai	51-55 1929-1933	56-60 1934-1938	61-65 1939-1943	66-70 1944-1948	71-75 1949-1953	
Fumier d'étable	40,0	48,9	37,2	35,9	49,8	
NPK	44,1	46,9	38,8	34,6	48,1	
Non fumée	18,2	22,8	16,2	16,4	22,5	

TABLEAU 2 *c*

Rendements du champ d'essai « Ewiger Roggenbau » à Halle/Saale de 1879 à 1948
(Moyennes sur dix ans)
(d'après ROEMER et IHLE (1925) et SCHMALFUSS (1950))

Parcelle d'essai	1-10 1879-1888	11-20 1889-1898	21-30 1899-1908	31-40 1909-1918	41-50 1919-1928	51-60 1929-1938	61-70 1939-1948
Grain en q/ha de récolte séchée à l'air							
Fumier d'étable	27,6	25,8	26,3	22,8	22,7	26,3	24,5
NPK	30,2	29,1	25,9	21,3	23,4	24,4	20,2
Non fumée	22,3	18,7	15,6	12,3	10,7	12,2	10,5
Paille et balle en q/ha de la récolte séchée à l'air							
Fumier d'étable	47,2	49,0	54,6	49,6	43,6	44,4	36,5
NPK	52,8	53,8	54,5	47,3	44,1	45,5	36,7
Non fumée	37,5	35,3	29,9	26,3	19,0	20,5	16,3
Grain et paille y compris balle							
Fumier d'étable	74,8	74,8	80,9	72,4	66,3	70,7	61,0
NPK	83,0	82,9	80,4	68,6	67,5	69,9	56,9
Non fumée	59,8	54,0	45,5	38,6	29,7	32,7	26,8

jusqu'à présent pour un calcul de tendance n'ont pu conduire à une solution satisfaisante. Les premiers rapporteurs, surtout ROEMER et IHLE, SCHMALFUSS ainsi que MERKER, ont essayé de préciser l'évolution de la fertilité du champ d'essai par une valeur moyenne pour des périodes de cinq, dix et quinze ans. De plus, l'interprétation est devenue difficile par suite du remplacement du seigle local *Saaleroggen* par la semence de la variété *Petkus* à partir de 1922. Étant donné que cette variété est plus pauvre en paille, le rapport grain/paille a subi une modification brusque. Pour le calcul de tendance, les rendements des grains sont par conséquent plus sûrs que ceux de la paille. Dans le rapport suivant sur les questions de fertilité du sol et la productivité de l'azote, les valeurs moyennes mentionnées sont considérées comme fiables (tabl. 2 *a*-2 *c*).

TABLEAU 2 *d*

Rendements du champ d'essai «Ewiger Roggenbau » à Halle/Saale de 1879 à 1953
(Moyennes sur quinze ans)
(d'après MERKER, 1956)

Parcelle d'essai	1-15 1879-1893	16-30 1894-1908	31-45 1909-1923	46-60 1924-1938	61-75 1939-1953
			Grain en q/ha (séché abs.)		
Fumier d'étable	23,0	23,1	18,5	23,2	22,8
NPK	26,0	23,4	17,9	22,2	19,6
Non fumée	18,1	14,8	9,7	10,9	9,5
			Paille et balle en q/ha (séchées abs.)		
Fumier d'étable	41,6	50,0	43,7	40,6	37,4
NPK	46,8	50,9	42,2	41,9	36,7
Non fumée	32,4	29,7	22,1	18,3	16,6
			Grain et paille, balle inclue		
Fumier d'étable	64,6	73,1	62,2	63,8	60,2
NPK	72,8	74,3	60,1	64,1	56,3
Non fumée	50,5	44,5	31,8	29,2	26,1

De la comparaison des valeurs moyennes calculées pour les différents intervalles de temps, on ne peut déduire une connaissance certaine et satisfaisante de l'évolution effective des rendements. Plus l'espace de temps choisi est long, plus on tend vers l'égalisation ; plus il est court, plus les fluctuations de la récolte se manifestent. Par conséquent, les essais postérieurs (MÜLLER et REIHER, 1966 ; RAUHE et LEHNE, 1966) pour trouver la tendance à l'aide d'équations mathématiques sont de grand intérêt. Cependant quelques remarques critiques doivent être présentées :

RAUHE et LEHNE se sont servi de l'analyse de régression et y ont mis à la baseune équation linéaire. Du point de vue théorique, ce procédé est en principe, car les processus biologiques ne suivent pas, en général, une problématique.

Normalement, les interventions dans un système en équilibre biologique se manifestent de telle manière qu'au début les modifications sont les plus grandes, puis elles diminuent, c'est-à-dire qu'elles se rapprochent asymptotiquement d'une nouvelle position d'équilibre adaptée aux conditions modifiées. Avec le dispositif « Ewiger Roggenbau » il faut partir d'un tel développement, car l'intervention biologique dans le système d'exploitation existant avant 1878 était fixée au commencement de l'essai permanent et le traitement des différentes parcelles est resté presque inchangé depuis. Les modifications faites entre-temps dans l'exécution de l'essai se limitent principalement aux changements de la semence en 1922 et de la fumure minérale azotée, pour laquelle au lieu de donner 50 p. 100 comme dans le passé, on donna, à partir de 1949, 75 p. 100 de N au printemps sous forme d'ammonitrate de calcium (auparavant nitrate de sodium).

Puisque les modifications dans la nature et la distribution dans le temps de la fumure minérale azotée ne concernent que les parcelles N ou NPK, les effets restent limités à ces parcelles ; ces modifications n'ont pas eu d'influence perceptible jusqu'à présent sur le rendement. C'est surtout par le changement de semence que les rendements de la paille ont été affectés. C'est pourquoi les calculs de tendance sur les rendements en grains connaissent un plus haut degré de probabilité. Par l'application de la fonction linéaire $y = a + b\,x$, RAUHE et LEHNE sont parvenus aux équations suivantes, en prenant pour base les rendements en grains, de 1879 à 1953 dans les trois parcelles choisies :

Non fumée ..... $y = 20{,}6 - 0{,}17\,x$
NPK ..... $y = 29{,}3 - 0{,}11\,x$
Fumier d'étable ..... $y = 25{,}9 - 0{,}01\,x$

Les auteurs font remarquer que la première interprétation de la variance analytique a conduit à un rapprochement des valeurs du rendement avec une courbe du 3e degré, mais qu'après, faute de « signification » des coefficients des termes du 3e degré en face des autres coefficients de l'équation, une courbe du 2e degré a été jugée comme satisfaisante. Pour la clarté et la possibilité de comparer, ils ont renoncé aussi au « terme en carré » de l'équation.

Mais cet abandon est la cause de l'interprétation fausse que, à notre avis, RAUHE et LEHNE ont donné de l'évolution du potentiel du rendement, particulièrement dans la comparaison des parcelles fumier avec celles NPK. Il est très probable que les conditions d'exploitation fixées en 1878 lors de l'installation de l'essai ont amené les différentes parcelles fertilisées à un nouvel équilibre après environ quarante ans d'essai. C'est pourquoi les modifications essentielles dans le rendement au cours du temps, dans le rapport détaillé de ROEMER et IHLE, pourraient être déjà achevées en grande partie. Le nouveau niveau du rendement est déterminé en premier lieu par l'approvisionnement du seigle en azote, qui est le facteur limitant décisif du rendement.

Des diminutions supplémentaires du rendement sont à craindre, particulièrement sur la parcelle non fumée, si, à côté de l'azote, d'autres éléments nutritifs sont réduits au minimum. En premier lieu, il faut penser à une fourniture du sol diminuée en K et P. Cette situation devrait se reconnaître par l'apparition d'une différence des potentiels de rendements entre la parcelle non fumée et la parcelle PK. D'après les données de l'essai qui nous ont été présentées, des différences de ce genre n'ont pas

été observées au cours des premiers soixante-quinze ans et n'ont pas été mentionnées dans les publications connues.

Une modification de l'état d'équilibre, en relation avec le facteur azote, est aussi concevable dans la parcelle NPK, si, par exemple, une carence en un élément mineur est provoquée par des rendements continuellement élevés, sans compensation par une fourniture supplémentaire du sol. Jusqu'à présent aucun signe de carence en élément mineur ne s'est manifesté.

Nous partons donc de l'hypothèse qu'au bout des quarante premières années de l'essai les positions d'équilibre ont été atteintes, et que, depuis ce temps-là, le potentiel du rendement s'est stabilisé sur chacune des trois parcelles. Une telle variation du potentiel de rendement depuis le commencement ne peut pas être exprimée par une fonction linéaire correspondant au modèle de RAUHE et LEHNE. Si l'on suivait les évaluations de ces auteurs, le rendement en grains calculé après soixante-quinze ans devrait par exemple tomber de 8,1 q/ha à 4,1 q/ha à présent (98 années d'essai). Quoique les rendements obtenus depuis 1953 nous soient inconnus, nous excluons une telle diminution du rendement sur la parcelle non fumée, si l'état de P et K du sol permet un niveau du rendement en grains de 9-10 q/ha, ce qui correspond à la position d'équilibre jusqu'à présent maintenue. Cette opinion est valable aussi pour la parcelle NPK, qui, d'après l'application de la droite de régression de RAUHE et LEHNE, devrait à présent montrer un potentiel moyen du rendement en grains de 18,6 q/ha. Pour ces deux parcelles, les rendements moyens des deux dernières périodes de cinq ans après une durée de l'essai de soixante-quinze ans sont cités à titre de comparaison, d'après le rapport de MERKER (tabl. 3). Ces résultats, qui sont influencés par des fortes fluctuations des rendements et qui montrent une augmentation considérable dans les cinq dernières années n'indiquent en aucune manière la tendance descendante postulée par RAUHE et LEHNE.

TABLEAU 3

Rendements moyens en grains (q/ha) *des deux dernières périodes de cinq ans sur les parcelles non fertilisées et fertilisées avec NPK dans l'essai permanent « Ewiger Roggenbau »*

(d'après MERKER, 1956)

Parcelle d'essai	Récolte séchée à l'air		Récolte abs. sèche	
	1944-1948	1949-1953	1944-1948	1949-1953
Non fumée	8,5	11,8	7,3	10,2
NPK	18,4	26,8	15,9	23,1

A cause de ces difficultés, MÜLLER et REIHER (1966) ont choisi pour le calcul de tendance le procédé du polynôme orthogonal. Pour l'interprétation de l'évolution des rendements, un polynôme du 3e degré a été utilisé, à savoir :

$$Y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3$$

Les termes de la fonction trouvée pour chaque parcelle fertilisée furent testés avec une erreur de probabilité de $\alpha = 5$ p. 100. Ensuite, l'équation fut chaque fois choisie en sorte que seulement pour $\alpha \leqslant 5$ p. 100, des termes significatifs forment respectivement la fonction.

Dans ces conditions et par l'application de la « méthode des moindres carrés », il en résulte la relation suivante pour le rendement en grains sur la parcelle non fumée :

$$Y(t) = 21{,}05 - 0{,}36\ t + 0{,}28 \cdot 10^{-2}\ t^2$$

Pour la période de 1879 jusqu'en 1953, cette équation décrit l'évolution d'une manière satisfaisante. Après une diminution du rendement au début, une position d'équilibre a été obtenue à partir de la 40e année de l'essai environ, pour laquelle le niveau semble se situer aux environs de 11 q/ha de grains. Si l'on part des résultats effectifs des récoltes, et si l'on prend pour base l'espace de temps de la 41e à la 75e récolte, on trouve une valeur moyenne de 11,3 q/ha pour la récolte séchée à l'air. Pour la parcelle NPK, MÜLLER et REIHER croyaient pouvoir négliger le « terme carré » et estimaient qu'une relation linéaire aurait été suffisante. Pour l'équation de tendance décrivant l'évolution du rendement en grains, ils ont trouvé :

$$Y(t) = 25{,}38 - 0{,}09\ t$$

Cette équation du 1er degré correspond à la mise en équation de RAUHE et LEHNE, et c'est pourquoi elle contient les mêmes défauts qui sont à rechercher essentiellement dans le fait qu'on a accepté à tort une diminution linéaire du rendement. Contrairement à RAUHE et LEHNE, ils limitent en effet rigoureusement l'interprétation à la période examinée, et indiquent qu'avec une durée d'essai prolongée, une autre mise en équation est imaginable. Afin de mieux justifier l'allure effective de la diminution des rendements sur la parcelle NPK, ils ont divisé les périodes d'essai de base en deux parties de quarante ans chacune, et trouvé que la diminution des rendements sur cette parcelle est achevée après la 4e décennie. Dans la deuxième partie de l'essai, la courbe du rendement a une allure linéaire horizontale et se place un peu en dessous de celle de la parcelle au fumier d'étable, qui pendant la durée d'essai, est restée au même niveau.

Par la division de la période d'essai en deux sections, la partie linéaire initiale fut abandonnée en ce sens qu'une équation du 1er degré fut acceptée seulement pour la première période de quarante ans ; pour l'évolution ultérieure en grains on eut une valeur fixe comme sur la parcelle au fumier d'étable.

En accord avec SCHMALFUSS (1950), nous sommes d'avis que sur la parcelle au fumier d'étable également, une diminution des rendements a eu lieu au début des essais — mais plus faible que sur la parcelle NPK — ; l'égalisation du niveau du rendement sur l'ensemble de la période d'essai ne donne lieu cependant à aucune conséquence grave sur l'interprétation.

Du point de vue théorique, ni la partie linéaire de RAUHE et LEHNE, ni la fonction du polynôme décrivant l'évolution du rendement ne rendent compte de l'évolution effective de celui-ci ; car avec aucune des deux équations le fait de tendre vers une valeur limite traduisant le nouvel équilibre ne peut être obtenu. Là, d'après notre opinion, une fonction de la forme $y = y_0 \cdot e^{-k \cdot t}$, ou une autre équation mathématique équivalente serait plus valable.

Comme nous ne disposons pas des données complètes de l'essai, un calcul de tendance fixé sur cette base n'a pas eu lieu jusqu'à présent.

Modifications dans la teneur du sol en C et N

Le concept de l'obtention d'un nouvel équilibre adapté à la monoculture du seigle sur les différentes parcelles fertilisées, après les quarante premières années d'essai est également confirmé par la modification de la teneur en humus du sol, non seulement pour le carbone mais aussi pour l'azote. Pour la confirmation de cette interprétation, le matériel d'essai est, contrairement aux résultats des récoltes, malheureusement insuffisant, parce que les déterminations de C et de N dans le sol n'ont été faites que de temps à autre et n'étaient en aucune façon sûres ; au commencement de l'essai, on a seulement déterminé le carbone et non l'azote. Le tableau 4

TABLEAU 4

Teneurs en carbone et en azote de l'essai permanent « Ewiger Roggenbau »

Teneur en C (p. 100)

Parcelle d'essai	1878 d'après Kühn	1912 d'après Weinaug	1922 calculé	1929 d'après Scheffer	1949 d'après Schmalfuss	1953 d'après Merker	1958 d'après Schmalfuss et Kolbe
Fumier d'étable ..	1,24	1,48	(1,61)	1,64	1,66	1,68	1,69
NPK	1,24	—	(1,20)	1,24	1,22	1,26	1,26
Non fumée	1,24	—	(1,12)	1,15	1,12	1,12	1,14

Teneur en N (p. 100)

	Calculé	Calculé	Calculé d'après Ihle (1)	Calculé d'après Scheffer (2)	d'après Schmalfuss	d'après Merker
Fumier d'étable....	(0,095)	(0,114)	(0,124)	(0,126)	0,125	0,132
NPK	(0,095)	—	(0,092)	(0,095)	0,095	0,094
Non fumée	(0,095)	—	(0,086)	(0,088)	0,086	0,085

(1) Valeurs originelles de Ihle : 0,116-0,086-0,080.
(2) Valeurs originelles de Scheffer : 0,109-0,080-0,071.

Rapport C/N

	Par calcul	Par calcul	Par calcul	D'après Scheffer	D'après Schmalfuss	D'après Merker
Fumier d'étable....	(13,0)	(13,0)	(13,0)	15,0	13,3	12,4
NPK	(13,0)	—	(13,0)	15,5	12,8	12,7
Non fumée	(13,0)	—	(13,0)	16,2	13,0	12,7

donne un aperçu relatif aux analyses présentes. Les valeurs entre parenthèses sont acquises par l'interpolation à partir du calcul.

Les résultats d'analyse en partie contradictoires ont conduit à des controverses considérables dans la littérature. Ou bien la valeur trouvée pour C = 1,24 p. 100 par KÜHN au commencement de l'essai est considérée comme trop basse (RAUHE et LEHNE, 1966) par suite de méthodes d'analyses défectueuses, ou les valeurs de N trouvées plus tard sont considérées comme trop élevées (SCHMALFUSS et KOLBE, 1966). Un accord existe cependant sur les valeurs de N déterminées par WEINAUG (1921) qui sont manifestement surestimées et ne peuvent être exactes. Nous sommes du même avis.

En ce qui concerne la question de savoir si la teneur en C au début des essais, et en particulier les valeurs trouvées par SCHEFFER (1931) pour l'azote du sol, sont à considérer comme inexactes, une réponse assez satisfaisante ne peut être obtenue qu'uniquement par des calculs de tendance, qui se basent d'après notre opinion sur les données plus sûres de SCHMALFUSS (1950), MERKER (1956) ainsi que SCHMALFUSS et KOLBE (1961 et 1966). D'après cela, le rapport C/N du sol en expérience, qui ne montre pas de différences spécifiques après soixante-quinze ans de monoculture sur les différentes parcelles avec fumure, peut être admis comme quasi-constant pour toute la période. Cette hypothèse est confirmée par l'expérience : ce rapport peut être considéré, pour une période s'étendant sur plusieurs dizaines d'années, comme une « constante de la nature » adaptée aux conditions données de sol et de climat. Les différences minimes entre les rapports C/N des 5 parcelles fertilisées justifient cette hypothèse malgré des fumures très différentes. Les analyses de SCHMALFUSS en 1949 ont donné des valeurs entre 12,8 et 13,3, celles de MERKER en 1953 entre 12,7 et 13,4.

L'hypothèse d'un rapport C/N quasi-constant rend possible un calcul inverse sur les résultats d'analyses ultérieurs de C et N. En accord avec SCHMALFUSS, nous considérons la détermination du carbone par KÜHN comme exacte et nous nous basons aussi sur une détermination du carbone effectuée par WEINAUG en 1912 pour la parcelle fumier d'étable, qui a donné une teneur en humus de 2,54 p. 100 (c'est-à-dire 1,48 p. 100 C).

Il faut attribuer en général à l'analyse du carbone effectuée alors une valeur d'authenticité et de sécurité supérieure à celle de l'analyse de l'azote d'après la méthode « Kjeldahl ». L'analyse élémentaire représentait une méthode sûre, alors que l'analyse «Kjeldahl » contient certaines erreurs, particulièrement en ce qui concerne l'azote oxydé qu'on ne peut déterminer complètement. Très souvent les valeurs de N étaient trop basses. Cela devrait être le cas pour l'analyse de N par IHLE (1922) et également par SCHEFFER (1931). Chez SCHEFFER, ce résultat se déduit du rapport C/N de 15:1 et de l'estimation de la valeur du C correspondant à la tendance. Chez IHLE ce résultat n'est justifié que par le calcul de tendance pour le carbone, à cause du manque de connaissance de la valeur de C.

Si on introduisait une valeur d'environ 7 p. 100 en plus, cela serait en accord avec les valeurs de C et N trouvées postérieurement sur toutes les parcelles avec fumure, d'autant plus que les données insuffisantes indiquent que les modifications dans le sol (teneur et évolution de l'humus) étaient terminées, comme celles des rendements, après quarante ans et qu'une stabilisation de l'équilibre humique dans le sol avait été atteinte.

Basées sur cette conception, les données relatives à N de IHLE et de SCHEFFER ont été corrigées avec conservation de la valeur du C. Cela nous semblait légitime, parce que dans les deux analyses les différences entre les parcelles fertilisées sont en accord avec les différences trouvées dans les analyses postérieures et que des analyses en tant que telles devraient être effectuées correctement par les auteurs. Les sources d'erreur provenant de l'échantillonnage (stockage, densité du sol, date du prélèvement) pourraient être considérées comme d'autres causes de la différence entre les valeurs de N obtenues par IHLE et SCHEFFER.

De la comparaison des résultats analytiques des trois parcelles les plus importantes de l'essai, complétés par l'interpolation (tabl. 4), on déduit en ce qui concerne la tendance de leurs modifications, le résultat suivant :

Sur la parcelle non fertilisée, après une décomposition initiale importante d'humus, on observe une stabilisation, après environ quarante ans, à un niveau de 1,12 p. 100 C. Cela signifie une réduction du niveau d'humus du départ d'environ 10 p. 100 et en conséquence, une production d'azote de 250-300 kg/ha N dans cet espace de temps.

Sur la parcelle NPK, le niveau d'humus initial est maintenu par l'apport des résidus de récoltes et des mauvaises herbes qui a compensé la décomposition de la matière organique du sol. L'azote minéralisé se lie après transformation organique aux résidus de récolte (cellulose, lignine et autres) qui sont riches en C. De ce fait, l'azote du sol n'était pas disponible.

Dans la parcelle au fumier d'étable, le bilan d'humus a été sans doute amélioré par l'apport annuel de 12 t de fumier. La teneur en carbone a constamment augmenté. Après environ quarante ans, elle a atteint, dans les conditions de sol et de climat données comme valeur « climax », un niveau de 1,65 p. 100 C correspondant à une nouvelle position d'équilibre.

Dans la première phase de la formation de l'humus, une partie de l'azote du fumier a été fixée et ne pouvait par conséquent intervenir sur les rendements. Cela explique pourquoi, dans les premières années ou décennies, la parcelle au fumier d'étable ne pouvait atteindre le niveau de rendement de la parcelle NPK, dans laquelle la fixation de N n'était pas supérieure à l'azote minéralisé. La supériorité légère ultérieure de la parcelle au fumier d'étable par rapport à la parcelle NPK résulte d'une meilleure efficacité de l'azote du fumier donné en plus grande quantité, après que la fixation de N consécutive à l'augmentation de l'humus ait été terminée. La mesure de la fixation biologique de N pendant la phase d'accroissement d'humus a atteint 900-1 000 kg/ha N (augmentation de la teneur en C d'environ 0,4 p. 100 les quarante premières années).

L'explication de l'évolution du rendement dans la période d'essai de soixante-quinze ans n'a donc besoin, ni de l'acceptation des valeurs du carbone douteuses du début de l'essai, ni de l'établissement des bilans douteux de N, comme l'avaient envisagé ROEMER et IHLE (1925) ainsi que RAUHE et LEHNE (1966). Ces réserves supplémentaires d'azote disponible qui proviennent de la décomposition de l'humus dans la parcelle non fumée pendant la « phase de transformation », ainsi que la fixation d'une partie de l'azote résultant de l'accroissement d'humus sur la parcelle fumier d'étable se reflètent aussi dans l'évolution des rendements dans ces deux parcelles (tabl. 2).

Approvisionnement en azote

Dans la question portant sur l'origine de l'azote prélevé par les récoltes en relation avec l'établissement d'un bilan azoté sur les différentes parcelles avec fumure, les conceptions trouvées dans la littérature sont en partie diamétralement opposées. Sans vouloir s'attaquer au pour et au contre des arguments cités, nous aimerions retenir les modifications des rendements et de la réserve du sol en humus comme base pour notre discussion et, par là, mettre en évidence que les explications qui peuvent présenter le plus haut degré de probabilité sont celles donnant lieu au minimum de contradictions dans l'interprétation du matériel d'expérience.

Sur l'origine et l'approvisionnement en azote de la monoculture de seigle, des indications décisives peuvent être obtenues si on prend comme point de départ la position d'équilibre stabilisée dans les trois parcelles de fumure. Sous ce rapport, la parcelle non fumée offre les conditions les plus simples pour l'établissement du bilan. L'azote trouvé dans les récoltes sur cette parcelle ne peut, par voie de calcul, provenir de la réserve du sol, puisque le niveau d'humus et le rapport C/N n'ont pas subi de modifications apparentes dans la phase d'équilibre. En tant qu'origine externe, la fixation de N_2 par des microorganismes autotrophes, hétérotrophes et par ceux vivant en symbiose, ainsi qu'en particulier, l'apport de N par les agents atmosphériques, ont déjà été cités dans des publications antérieures. Alors que MERKER évalue cette quantité à 25 kg N/ha et par an, ROEMER et IHLE, d'après des analyses faites dans des essais de jachère par SCHNEIDEWIND, ont évalué les quantités d'azote correspondantes à 33 kg. En outre, il faut ajouter l'azote (environ 2,6 kg) contenue dans la semence. RAUHE et LEHNE (1966) ont comparé les prélèvements d'N correspondant aux valeurs moyennes sur quinze ans au début de l'essai et après soixante-quinze ans (tabl. 5).

TABLEAU 5

Prélèvements d'N par les récoltes ;
valeurs moyennes sur quinze ans au début de l'essai et après soixante-quinze ans
(d'après RAUHE et LEHNE, 1966)

Parcelle d'essai	Grain			Paille			Total N (kg/ha)
	Rendement (q/ha)	N (%)	N (kg)	Rendement (q/ha)	N (%)	N (kg)	
Au début de l'essai (1879-1893)							
Non fumée	18,1	1,77	32,0	32,4	0,39	12,6	44,6
NPK	26,0	1,82	47,3	46,8	0,38	17,8	65,1
Fumier d'étable ...	23,0	1,81	41,6	41,6	0,40	16,6	58,2
Après soixante-quinze ans de la durée d'essai (1939-1953)							
Non fumée	9,5	1,63	15,5	16,6	0,39	6,5	22,0
NPK	19,6	1,65	32,3	36,7	0,39	14,3	46,6
Fumier d'étable ...	22,8	1,70	38,8	37,4	0,39	14,6	53,4

En consequence, dans la période 1939-1953, les quantités de 22 kg N/ha prélevées annuellement par la récolte sur la parcelle non fumée proviennent de sources externes. Elles sont d'ailleurs à évaluer à un niveau un peu plus élevé, si on prend pour base les prélèvements dans la période des trente dernières années.

Comme l'utilisation de l'azote offert ne peut jamais atteindre 100 p. 100 mais peut monter à 75-80 p. 100 pour de faibles concentrations en N dans le cas le plus favorable, les quantités d'azote citées par ROEMER et IHLE apparaissent comme vraisemblables. Cela veut dire que le niveau du rendement sur la parcelle non fumée en équilibre est obtenu exclusivement grâce à l'apport de N par les agents atmosphériques, la fixation biologique de N_2 et l'azote de la semence. Les prélèvements d'azote plus élevés des premières années, correspondant aux rendements plus élevés, furent en premier lieu assurés par l'azote provenant de la décomposition de l'humus ; une meilleure utilisation de N pourrait avoir jouer un rôle supplémentaire.

Sur la parcelle NPK viennent s'ajouter à l'approvisionnement en N par les sources mentionnées ci-dessus les apports annuels de la fumure minérale de 40 kg N/ha. Ce sont eux qui, au début, ont élevé d'une manière remarquable le niveau des rendements. La diminution des rendements qui a été observé jusqu'à l'obtention de l'équilibre dynamique fut accompagnée de prélèvements d'azote également réduits. L'utilisation de la fumure azotée s'est réduite considérablement, ce qu'on peut également reconnaître d'après la teneur plus faible des grains en N. Par contre, la parcelle au fumier d'étable montre une dynamique de N plus favorable. Les prélèvements en N peu élevés, par comparaison avec la parcelle NPK au début, s'expliquent par la fixation permanente d'une grande partie de l'azote utilisée pour l'accroissement de l'humus, malgré l'apport élevé par le fumier d'étable de 65 kg/ha N annuellement. Ces quantités d'azote supplémentaires, après la stabilisation du niveau élevé d'humus correspondant au nouvel équilibre (1,65 p. 100 au lieu de 1,24 p. 100 C) ne conduisent pas à un prélèvement élevé d'azote, à cause de l'exploitation diminuée (comme pour la parcelle NPK) ; ces quantités de N ne peuvent même pas compenser complètement l'utilisation moins élevée. La baisse de la dynamique des éléments nutritifs au cours de l'essai se voit confirmée par la diminution des coefficients de minéralisation, qui est traitée plus loin.

Débit de l'humus et fertilité du sol

La dynamique différente du d'ébit de la matière organique dans le sol sur les trois parcelles fertilisées qui résulte des différents effets et de l'utilisation de l'azote indique déjà que les trois parcelles doivent se différencier considérablement dans leurs fertilités et leurs activités microbiennes. Déjà la teneur en humus différente des parcelles conduit à cette conclusion. MERKER (1956) s'est particulièrement intéressé à la signification de l'activité microbienne pour l'évolution de la matière organique du sol. Dans des essais sur la respiration du sol réalisés en des temps différents, avec une humectation du sol suffisante, dans des récipients de 3 l à la température ambiante, il a pu montrer, d'après la quantité de CO_2 produite pour chaque kg de matière sèche du sol, une destruction de la matière organique élevée en rapport avec un meilleur approvisionnement en humus (tabl. 6). On arrive également à ce résultat par l'évaluation du bilan d'humus valable pour les conditions naturelles du champ d'essai, si on part de la position d'équilibre caractérisée par la stabilisation

TABLEAU 6

Essais sur la respiration des sols de l'essai permanent « Ewiger Roggenbau »
Somme des valeurs dans le temps en mg CO_2 *par kg de terre* (séchée abs.)
(d'après MERKER, 1956)

Parcelle d'essai	Essai I/51 70 jours	Essai II/51 21 jours	Essai 52 28 jours
Fumier d'étable	1 769	491	943
NPK	1 450	408	733
Non fumée.....	1 156	325	534

du niveau d'humus sur les différentes parcelles avec fumure. En équilibre humique, il se minéralise autant de substance organique que l'on en apporte au sol, dans la même période, par les résidus de récolte, engrais vert (y compris mauvaises herbes) et fumure humique (p. ex. : fumier d'étable). Pour ce cas, il existe une relation mathématique simple :

$$A = k_m \ (H_o + A),$$

où A représente l'apport annuel de matière organique sèche en t/ha, H_o, la quantité d'humus existant dans le sol avant cet apport en t/ha et k_m le coefficient de minéralisation moyen.

Comme H_o représente en grande partie des composés humiques résistants, c'est-à-dire les formes d'humus stabilisées dans le sol, la fraction annuelle minéralisée de H_o est en général inférieure à celle des matières organiques facilement décomposables (A). Le coefficient moyen de minéralisation se compose donc au moins du coefficient partiel exact pour H_o et pour A, c'est-à-dire $k_m = k_{Ho} + k_A$, où k_{Ho} est constamment $\ll k_A$.

Pour des raisons de simplification, il n'est pas nécessaire de traiter à fond cette différenciation ; il faut plutôt considérer k_m comme une expression globale de la destruction de la matière organique totale du sol. Naturellement, la quantité k_m ne dépend pas seulement de H_o et A, mais également des conditions de climat et de sol qui influencent les conditions de vie des organismes du sol. Comme ces conditions sont assez homogènes pour le champ d'essai (à part les différences dans la réaction du sol et la teneur en éléments nutritifs), la valeur k_m peut être considérée comme mesure de la dynamique de l'humus et de l'état de fertilité des trois parcelles fertilisées. Après transformation de l'équation, nous obtenons :

$$k_m = \frac{A}{H_o + A}$$

L'apport « A » se compose principalement des résidus de racines et de récoltes dans le sol, et, sur la parcelle fumier, du supplément annuel de 12 t/ha de fumier d'étable. L'apport par la masse des microorganismes nouvellement formés et par les mauvaises herbes ne peut être considéré, car il n'existe pas de données exactes à ce sujet, et la quantité relative à cet apport peut être négligée.

Les quantités de résidus de racines et de chaumes sont calculées à partir des données expérimentales de KÖHNLEIN et VETTER (1953) relatives aux rendements en grains et en paille. Ces deux auteurs sont parvenus, après des analyses considérables, au résultat que le seigle laisse environ 12 q/ha de résidus de récolte sur un sol de limon. A cela s'ajoute la masse radiculaire déjà décomposée qui se forme et dépérit pendant la période de végétation et qui peut être égale à la masse visible de racines qui reste dans le sol après la récolte. Ces quantités sont évaluées à 7 q/ha dans le cas de leurs essais sur sol limoneux.

D'après ces indications, 1/4 de la récolte totale peut être considéré comme résidu avec une teneur moyenne en C de 50 p. 100 pour la « Ewiger Roggenbau ». Dans le calcul de l'apport en carbone par le fumier d'étable, nous prenons pour base l'évaluation de MERKER avec 1,5 t de C par ha et par an. La quantité H_o, c'est-à-dire la quantité d'humus se trouvant dans le sol, est obtenue pour la période 1924-1953 d'après les valeurs moyennes des analyses du C. Le résultat de ces calculs des coefficients moyens annuels de minéralisation et de l'évolution annuelle est présenté au tableau 7.

TABLEAU 7

Coefficients moyens annuels de minéralisation après stabilisation du bilan de l'humus de l'essai permanent « Ewiger Roggenbau »

Parcelle d'essai	Apport annuel A (t/ha C)	Réserve en humus H_0 (t/ha C)	Valeur k_m	Destruction annuelle de l'humus (%)
Fumier d'étable	2,28	49,80	0,044	4,4
NPK	0,75	36,60	0,020	2,0
Non fumée	0,35	33,90	0,010	1,0

Par l'apport annuel de fumier a lieu une activation continuelle du complexe humique du sol, qui se manifeste par une destruction moyenne annuelle de 4,4 p. 100. La parcelle NPK se comporte comme moins active biologiquement, car l'évolution de

TABLEAU 8

Modification des coefficients moyens annuels de minéralisation au cours des soixante-quinze ans de l'essai permanent « Ewiger Roggenbau »

Parcelle d'essai	Valeur moyenne de k_m		Décroissance des valeurs de k_m %
	1879-1908	1924-1953	
Fumier d'étable	0,055	0,044	20
NPK	0,025	0,020	20
Non fumée.....	0,017	0,010	41

son humus n'est stimulée que par les résidus de récolte. Avec une moyenne de 2 p. 100, le coefficient de minéralisation n'atteint même pas la moitié de la valeur observée sur la parcelle fumier. Sur la parcelle non fumée, il baisse encore de 50 p. 100 parce que des quantités moins élevées de résidus de récolte demeurent dans le sol. A cet égard, la question de la diminution de l'activité biologique au cours des soixante-quinze ans de culture de seigle est d'un intérêt considérable. On obtient le meilleur aperçu en comparant les valeurs k_m calculées, pour un espace de temps comparable (trente ans), au début de l'essai et après l'équilibre atteint postérieurement (tabl. 8).

On peut déduire de ce tableau que par suite de la monoculture, la dynamique de l'humus au cours du temps a diminué sur les trois parcelles. La diminution relative du coefficient de minéralisation est à peu près la même sur la parcelle au fumier d'étable et sur la parcelle NPK ; toutefois la parcelle au fumier d'étable montre toujours après soixante-quinze ans d'essai, pour ce coefficient, une valeur remarquablement élevée. STIMMING (1955) a trouvé des résultats semblables. La parcelle non fumée est touchée en particulier par la diminution de l'activité biologique, de sorte que des effets défavorables auraient pu s'être manifestés sur les propriétés chimiques et physiques du sol.

Plus précisément, la dynamique des éléments nutritifs est en général considérablement influencée par une diminution des processus de transformation. Cela est valable pour tous les éléments nutritifs des plantes, qui sont ou bien fortement adsorbés sur des composés minéraux du sol, ou bien fixés par des liaisons chimiques réelles (phosphate, éléments mineurs). De la même façon, le « pouvoir de réagir » pour les minéraux et les roches, provenant de la désagrégation biologique, diminue plus ou moins fortement, ainsi que la mobilisation des éléments peu mobiles par la formation de complexes (chelates). Le même processus influence l'effet protecteur des colloïdes humiques quant à la fixation des éléments nutritifs minéraux. C'est pourquoi nous supposons que, par suite de la diminution de l'activité biologique principalement dans la parcelle non fumée, non seulement la mobilisation mais également l'utilisation des éléments nutritifs ont été influencées négativement. Le fait qu'une action influençant la dynamique des éléments nutritifs se poursuit parallèlement à la diminution des valeurs k_m et peut exercer un effet limitant du rendement, même avec une offre suffisante en éléments nutritifs, est illustré d'une manière convaincante par un essai en pots réalisé par MERKER en 1954, où le sol des différentes parcelles fut testé au point de vue de sa productivité. Dans cet essai, le sol de la parcelle fumier a produit le plus haut rendement en matière sèche (70,3 g par pot), suivi du sol de la parcelle NPK avec 66,9 g par pot. Sur le sol de la parcelle non fumée, on a récolté seulement 62,5 g de matière sèche malgré la fourniture équivalente en éléments nutritifs. Par conséquent, il n'existe aucun doute que les valeurs k_m reflètent bien la dynamique des éléments nutritifs, et qu'elles peuvent être prises comme mesure de l'état de fertilité d'un sol. A cet égard, la parcelle au fumier d'étable — en accord avec la conception de RAUHE et LEHNE (1966) — est nettement supérieure non seulement à la parcelle non fumée, mais aussi à la parcelle NPK.

A coup sûr, l'effet qui en résulte sur la productivité dans les conditions de culture en plein champ, se montre relativement peu important par comparaison avec la parcelle NPK. Les rendements moyens de la parcelle fumier sont à peine supérieurs à ceux de la parcelle NPK, dans l'état d'équilibre obtenu, quoique 50 p. 100 d'azote de plus soit apporté au sol par le fumier. Comme l'azote est l'élément nutritif domi-

nant dans la productivité de la culture « Ewiger Roggenbau », le niveau de rendement un peu plus élevé de la variante au fumier d'étable par rapport à la parcelle NPK demande une explication : à notre avis, elle devrait pouvoir se trouver dans la plus grande quantité d'N minéralisé à partir de la matière organique.

Le climat de l'Allemagne centrale, déjà de nature continentale conduit à deux pointes d'activité biologique distinctes pendant l'année — une au printemps, dès que le sol humide de l'hiver s'est réchauffé suffisamment — une seconde en automne, aussitôt que le sol sec est humecté de nouveau. Dans ces deux périodes, une grande partie de la matière organique se transforme, particulièrement le fumier d'étable, et en conséquence, l'azote se trouve sous forme d'azote minéralisé, essentiellement nitrate.

Les besoins en azote des semences dans la phase de germination en automne et ceux des plantes au début de leur croissance au printemps sont relativement peu élevés vis-à-vis de l'azote disponible, de sorte que des quantités d'azote considérables pourraient être lessivées (profondeur du plan d'eau en moyenne de 1,10 m). En outre il faut compter en hiver avec une forte humectation (particulièrement par la neige) et avec des pertes de N par dénitrification.

Plus la transformation biologique est intense dans les périodes où les besoins des plantes sont faibles, plus l'azote du fumier se perd.

En raison du contrôle de la fumure minérale azotée et des quantités moins élevées fournies, la perte en N sur la parcelle NPK est moins élevée, aussi bien par lessivage que par dénitrification, d'autant moins que le rapport élevé C/N dans les résidus de racines et chaumes (60-100/1) s'oppose à ces pertes, ce qui n'est pas le cas chez le fumier.

Le niveau du rendement de l'essai permanent « Ewiger Roggenbau » est déterminé principalement par l'approvisionnement en N. L'effet favorable du fumier sur la fertilité est compensé largement par les grandes pertes en N par suite de la décomposition biologique, de sorte que, comparé aux apports moins élevés de N minéral (40 kg/ha N) de la parcelle NPK, il ne reste aucun excédent en N suffisant dans la variante fumée au fumier d'étable. Malgré un meilleur état de fertilité, on n'obtient pas de rendement élevé.

Remarque finale

Les données acquises après soixante-quinze ans de la culture « Ewiger Roggenbau » à Halle/Saale sur les récoltes et les modifications des caractères du sol sous l'influence de différentes fumures, offrent, malgré toutes les lacunes des expériences — particulièrement sur l'état du carbone et d'azote du sol — une base précieuse pour obtenir des connaissances générales sur les processus de régulation dans un système écologique avec des interventions constantes et continuelles et pour en étudier les conséquences.

Pour l'interprétation des résultats, on ne peut en effet utiliser les valeurs d'origine de périodes à court terme. De même, les analyses du sol faites de temps à autre ne devraient pas être surestimées en ce qui concerne sûreté, justesse et exactitude, d'autant moins que les sources d'erreur attachées à l'échantillonnage et à l'analyse ne peuvent être appréciées avec une exactitude suffisante. Pour que de telles incertitudes soient réduites au minimum, des calculs de tendance sont indispensables. Dans

leurs expressions mathématiques, on devrait préférer des équations qui tiennent compte des variations biologiques possibles et de l'application de la « méthode des moindres carrés ».

De tels calculs, faits pour saisir la tendance de l'évolution des rendements sur le champ d'essai « Ewiger Roggenbau » dans les dernières années, sont des premières tentatives, et demandent encore à être perfectionnés.

Les équations linéaires devraient rester limitées à des périodes à court terme, pour qu'on puisse reconnaître la tendance à partir des différentes inclinaisons des droites. Les calculs de tendance qui utilisent des données devraient également être appliqués aux modifications dans le sol sous l'influence permanente des fumures. Cela ne concerne pas seulement les modifications dans l'état des bases qui ne sont pas traitées dans cet exposé, mais aussi la matière organique du sol, qui se trouve constamment en transformation, donc la teneur en C et N. Même si les analyses nécessaires du sol n'ont été faites qu'occasionnellement et ont été peu nombreuses, elles donnent des indications importantes sur les variations correspondantes dans le sol. A cause des fluctuations peu considérables qui marquent les modifications dans le temps de la teneur en humus, contrairement à celles des rendements, ces valeurs sont plus sûres pour les calculs de tendance et accessibles aussi bien pour l'interpolation que l'extrapolation. Si ces valeurs typiques pour caractériser le sol sont groupées pour une expérience biologique étendue, on obtient, malgré les défauts existants, des indications précieuses sur C et N du sol.

Un tel procédé n'exclut pas la possibilité de critiquer les résultats d'analyse, qui, apparemment, ne devaient pas être exacts pour la comparaison avec les autres données disponibles et les valeurs de tendance trouvées. Cela se justifie par exemple avec un haut degré de probabilité pour les analyses de C et N sur le champ d'essai « Ewiger Roggenbau » publiées par SCHEFFER en 1929. La question qui en résulte, si les valeurs de C ou de N ou les deux sont incertaines, peut uniquement recevoir une réponse à partir du rapport du C/N et de la tendance recherchée.

En accord avec SCHMALFUSS (1950) et MERKER (1956), nous sommes d'avis que les valeurs de C sont justes ; par contre, les valeurs de N sont sous-estimées. Cela peut provenir d'une réduction incomplète de l'azote nitrique, ou peut avoir d'autres causes.

En général, nous attribuons une plus grande justesse à la détermination du C par tous les auteurs et n'avons, par conséquent, aucun doute quant aux résultats que KÜHN a trouvés au commencement de l'essai.

Nous croyons, avec notre présentation et notre interprétation, avoir pu montrer que les conclusions tirées du matériel de l'essai présenté jusqu'à maintenant par SCHMALFUSS et collaborateurs (SCHMALFUSS, 1950 ; MERKER, 1956 ; SCHMALFUSS et KOLBE, 1961 et 1966) devaient être en général exactes. A cet égard, la certitude finale peut être seulement donnée par d'autres résultats d'essai dans le futur, à supposer qu'en dehors de l'azote, aucun facteur supplémentaire ne limite le rendement et ne donne une fausse représentation, comme par exemple, l'épuisement des réserves du sol en P et K disponibles pour les plantes dans la parcelle non fumée, ou la carence en éléments mineurs.

Reçu pour publication en septembre 1976.

SUMMARY

SOIL FERTILITY AND NITROGEN BALANCE IN THE LONG-TERM FERTILIZER EXPERIMENT « EWIGER ROGGENBAU » (CONTINUOUS GROWTH OF RYE) AT HALLE/SAALE

The yields of the more than 80 years rye monoculture were greatly affected by fertilization. The relevant plots unfertilized, farmyard manure treatment and NPK-mineral fertilization are characterised by an initial period of some decreasing yields. In the case of the field trial « Ewiger Roggenbau » the transition period took about 40 years followed by a time of relative constant yield level up to date, which can be interpreted as the new positions of equilibrium. The trend of yielding can be described by mathematic equations of higher degrees or e-functions, which give the best approximation to the real tendency of yielding.

Of course there were great yield differences of more than 100 p. 100 between the unfertilized and fertilized plots but clear differences were not evident between the farmyard manure and the NPK-fertilized variants over the long time of experimentation, although the nitrogen supply by farmyard manure was about 50 p. 100 more than by mineral fertilization. C- and N-analysis of the soil indicated in the course of the time an increasing concentration of organic matter in the soil of the farmyard manure treated plots, a relative constant concentration in the NPK-fertilized variant and a decreasing trend in the unfertilized ones. In the same way the mineralization rates of the soil organic matter decrease from the farmyard manure treated plot (4,4 p. 100) to NPK-fertilization (2 p. 100) and to unfertilized plot (1,0 p. 100).

In this regard the farmyard treated plot showed the highest soil fertility, but loss of soil nitrogen in the poor vegetation winter period will be the main reason for a relative low effectivity of farmyard manure nitrogen. After a period of 75 years rye monoculture the mineralization rates have been decreased in the farmyard manure and mineral fertilizer treated plot about 20 p. 100, in the unfertilized variant even about 40 p. 100. The future data will show if this decrease of soil fertility will affect the yields more than in the past.

ZUSAMMENFASSUNG

BODENFERTILITÄT UND N-HAUSHALT DES STÄNDIGEN DÜNGUNGSVERSUCHS « EWIGER ROGGENBAU » IN HALLE/SAALE

Die vorliegende Abhandlung setzt sich mit den kontroversen Auffassungen und Interpretationen der Versuchsergebnisse des im Jahr 1878 angelegten Dauerversuches « Ewiger Roggenbau » in Halle/Saale auseinander. Sie widmet sich eingehend der Frage des Humusumsatzes und den zeitlich wie düngungsmässig bedingten Anderungen der Mineralisationsrate auf den drei Parzellen Stallmistdüngung, NPK-Düngung und ungedüngt. Dabei wurden nachfolgende Einsichten gewonnen :

1. Für die trendmässige Erfassung der Ernten sind solche mathematischen Formulierungen am besten geeignet, die dem biologischen Ablauf der Geschehnisse Rechnung tragen.

2. Für die recht spärlichen und in unregelmässigen Zeitabständen durchgeführten C- und N-Analysen des Bodens sind ebenfalls Trendberechnungen möglich und zulässig, wenn das C/N-Verhältnis über die gesamte Versuchsdauer hinweg als quasi-konstant angesehen wird.

3. Aufgrund der als richtig angesehenen Kohlenstoffbestimmungen ist auf der NPK-Parzelle der Humusspiegel im Verlauf der 75 jährigen Versuchsdauer unverändert geblieben, auf der Stallmistparzelle von anfänglich 2,13 p. 100 im Verlauf der ersten 40 Jahre auf ein dann gleichbleibendes Niveau von 2,84 p. 100 angestiegen. Auf der ungedüngten Parzelle hat ein Humusabbau bis auf einen der neuen Gleichgewichtslage angepassten Humusspiegel von 1,94 p. 100 stattgefunden.

4. Die anfänglich auf der Stallmistparzelle im Vergleich zur NPK-Parzelle niedrigeren Erträge haben ihre Ursache in der durch den Humusaufbau bedingten N-Festlegung von etwa 900-1 000 kg/ha N. Die N-Versorgung des Roggens auf der ungedüngten Parzelle entstammt ausschliesslich N-Quellen ausserhalb des Bodens.

5. Die Mineralisationsraten auf den 3 Düngungsparzellen zeigen deutliche Unterschiede. Gegen Ende der ausgewerteten Versuchsdauer liegt der jährliche Humusumsatz auf der Stallmistparzelle bei 4,4 p. 100, auf der NPK-Parzelle hingegen bei 2,0 p. 100 und auf der ungedüngten Parzelle nur noch bei 1,0 p. 100.

Alle drei Parzellen haben einen wenn auch unterschiedlich hohen Verlust an mikrobieller Aktivität aufzuweisen, was die Nährstoffdynamik — insbesondere die Ausnutzung des N-Angebotes — nachteilig beeinflusst.

РЕЗЮМЕ

О плодородии почвы и балансе азота в постоянном опыте удобрения « Эвигер Роггенбау » (постоянная монокультура ржи) в Халле/Сааль.

Е. ВЕЛЬТЕ, Ф. ТИММЕРМАНН.

В данной работе указываются различные концепции и интерпретируются результаты постоянного опыта « Эвигер Роггенбау », начатого в 1878-м году в Халле/Сааль. Опыт этот, в особенности, посвящен вопросам эволюции гумуса и изменений квот минерализации азота в вариантах удобрения навозом, минерального удобрения и без удобрения. До сих пор получены были следующие результаты :

1. Самыми подходящими математическими формулами для определения тенденции эволюции урожайности являются те, которые принимают во внимание динамику биологических процессов, иначе говоря, в частном случае опыта « Эвигер Роггенбау », формулы позволяющие ассимптотическое приближение к позиции равновесия, отвечающей данной системе ведения хозяйства.

2. Для анализов C и N почвы, которые недостаточны, и проводятся в очень нерегулярные промежутки времени, рассчеты тенденций также возможны и могут быть приняты во внимание, если соотношение C/N рассматривается в течении опыта как постоянное. Педологические эксперименты подтверждают это. И, вообще, определение C может рассматриваться как более точное чем определение N с помощью метода Кьельдаля, дающего заниженные значения в случаях недостаточности восстановления окисленного азота.

3. Если считать определение углерода точным, можно сказать что уровень гумуса в делянке получившей NPK остается неизменным в течении 75-ти лет опыта. На делянке получавшей навоз уровень этот повышается на 2,13-2,84 % в течении 40 первых лет, и остается затем неизменным. На делянке неудобренной, гумус разлагается в течении 40 первых лет, до достижения уровня в 1,94 %, соответствующему новому равновесному состоянию.

4. Урожайность, вначале более слабую на делянке с навозом, чем на делянке NPK, можно об' яснить закреплением 900-1 000 кг/га азота и увеличением содержания гумуса. И, напротив, повышенная урожайность первых лет на неудобренной делянке, по сравнению с уровнем урожайности равновесной фазы, об' ясняется разложением гумуса и получением таким образом добавочного азота. На неудобренной делянке рожь снабжается (по рассчетам) азотом исключительно из источников этого элемента расположенных вне почвы.

5. Процент минерализации азота почвы очень различен для трех делянок получавших удобрение. Годичное превращение гумуса по истечении 75-ти лет опыта, равняется приблизительно 4,4 % для делянки с навозом, и, напротив, оно едва достигает 2,0 % на делянке NPK и 1,0 % на неудобренной делянке. Состояние плодородия почвы будет значит лучшим на делянке получавшей навоз.

В течении 75-ти лет опыта процент минерализации прогрессивно уменьшался на всех трех делянках и уменьшение это достигло 20 % на делянках с навозом и с NPK и 41 % на делянке без удобрений.

Это означает что на всех трех делянках отмечается ослабление микробиальной активности, даже если она и проявляется по разному, что отрицательно влияет на динамику питательных элементов и, особенно, на использование наличного азота.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BÖHME R. W., 1930. Die Dauer Ertragsfähigkeit der Böden unter verschiedenen Anbausystemen. *Kühn-Archiv*, **26**, 276-284.

KÖHNLEIN J., VETTER H., 1953. *Ernterückstände und Wurzelbild.* Parey Verlag Hamburg.

KÜHN J., 1901. *Das Versuchsfeld des Landw. Institutes der Universität Halle/Saale.* Ber. physiol. Labor u. Versuchsanstalt des landwirtsch. Inst. Univ. Halle, 169.

MERKER J., 1956. Untersuchungen and en Ernten und Böden des Versuchs «Ewiger Roggenbau » in Halle (Saale). *Kühn-Archiv*, **70**, 153-215.

MÜLLER P., REIHER W., 1966. Auswertung langjähriger Ertragsfeststellungen. *Albrecht-Thaer-Archiv*, **10**, 43-54.

RAUHE K., LEHNE I., 1966. Betrachtungen zu den Ergebnissen des Dauerdüngungsversuches « Ewiger Roggenbau » in Halle im Hinblick auf die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit. 2. Mitteilung : Die Stickstoffentzüge und der Stickstoff im Boden. *Albrecht-Thaer-Archiv*, **10**, 19-33.

ROEMER Th., IHLE H., 1925. Die Einfelderwirtschaft auf dem Versuchsfeld des Institutes für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Universität Halle. *Kühn-Archiv*, **9**, 13-52.

SCHEFFER F., 1931. Chemische und biologische Untersuchungen über den Nährstoffgehalt der Böden des « Ewigen Roggenbaues » in Halle/Saale. *Archiv für Pflanzenbau*, **7**, 169.

SCHMALFUSS K., 1950. Siebzig Jahre « Ewiger Roggenbau ». *Kühn-Archiv*, **63**, 1-14.

SCHMALFUSS K., KOLBE G., 1961. Der « Ewige Roggenbau » in Halle nach 80 Jahren. Wiss. Z. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. *Math.-Naturwiss.*, R., **10**, 425.

SCHMALFUSS K., KOLBE G., 1966. Einige Bemerkungen zu den Ergebnissen des « Ewigen Roggenbaus » in Halle. *Albrecht-Thaer-Archiv*, **10**, 35-43.

STIMMING H. H., 1955. *Neuere Ansichten zur Humusbedarfsfrage.* Diplomarbeit Landw. Fak. Univ. Göttingen.

WEINAUG W., 1921. *Über Bodenuntersuchungen der Roggenparzellen im statischen Versuch des landwirtschaftlichen Versuchsfeldes der Universität Halle.* Diss. Martin-Luther-Univ. Halle.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 743-769.

LONG-TERM ROTATION EXPERIMENTS AT ROTHAMSTED AND SAXMUNDHAM EXPERIMENTAL STATIONS : THE EFFECTS OF TREATMENTS ON CROP YIELDS AND SOIL ANALYSES AND RECENT MODIFICATIONS IN PURPOSE AND DESIGN

G. E. G. MATTINGLY and A. E. JOHNSTON

Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Herts. AL 5 2 JQ, England

SUMMARY

This paper describes the results from, and recent modifications to, three rotation experiments in Southern England. The oldest experiment, the Agdell rotation, started at Rothamsted Experimental Station in 1848 and continued, almost unchanged, until 1951. It compared two four-course rotations *a*) swedes, barley, clover (or beans) and winter wheat ; *b*) swedes, barley, fallow and winter wheat. The manurial treatments were : unmanured, PKNaMg fertilisers and NPKNaMg fertilisers applied once every four years to the swedes. There were only six plots and one crop was present each year. From 1952-57 the site was either fallowed or cropped uniformly while acid soils were chalked. Since 1958, the plots have been sub-divided to test, in micro-plot experiments, the value of the P and K residues remaining in the soil.

Two rotation experiments were started in 1899 at Saxmundham Experimental Station, Suffolk. The first (Rotation I) consisted of a four-course rotation of wheat, mangolds, barley and a legume (beans, peas or clover). Manurial treatments, applied each year, included farmyard manure, bonemeal and all combinations of N, P and K fertilisers. There were four replicates of ten treatments and each crop was present each year. The experiment, which continued unchanged until 1965, was modified, between 1966-69, to test the value of larger amounts of farmyard manure and N, P and K fertilisers for the same four arable crops. It was further modified, from 1970 onwards, to compare the production of grass and lucerne and the rates of removals of N and K from the soil.

The Rotation II experiment at Saxmundham tested the same four-course rotation as Rotation I but the treatments varied according to the crop grown. It was designed to determine how limited amounts of farmyard manure and N and P fertilisers could most profitably be used by the four arable crops. It continued unchanged until 1952 and some of the plots were cropped with the original manuring until 1964. From 1965-74 these plots have been used for experiments, which are described briefly, on the value of the residues of phosphate fertilisers for barley, potatoes and sugar beet.

INTRODUCTION

This paper describes three arable rotation experiments, one at Rothamsted and two at Saxmundham, Suffolk (Rotations I and II). These experiments are sited on clay loams (Rothamsted) and sandy clay loams (Saxmundham). Brief descriptions of their physical properties are given by Cooke (this Conference).

The main purpose of this paper is : i) to summarize yields of the crops during the years when the experiments remained unchanged ; ii) to describe the reasons for modifying the treatments in the last 25 years (or less) and the yields that have resulted from these changes ; iii) to relate yields to the amounts of nutrients supplied to the crops and iv) to construct balance sheets which relate net gains by or losses of nutrients from the soils with changes in the available nutrients in the soils.

The following conventions are adopted in this paper. Data are in metric units derived, by conversion, from the original Imperial units. Grain and straw yields are at 85 p. 100 dry matter, grass at 100 p. 100 dry matter. Yields of root crops (in tonnes per hectare, t ha^{-1}) are of fresh clean roots, sugar from beet is given as t sugar ha^{-1}. Nutrients are always given as kg element ha^{-1}.

EXPERIMENTAL METHODS AND MATERIALS USED

Many methods of both crop and soil analyses have changed during the past 25 years. Those given below have been used most widely and any important modifications are described in the text.

Crop analysis

Nitrogen was estimated by Kjeldahl digestion using H_2SO_4-K_2SO_4 and $CuSO_4$ as a catalyst; ammonia was determined by steam distillation or on the Technicon Auto-Analyzer using the method of VARLEY (1966).

Phosphorus was determined, after dry ashing, by either colorimetric estimation with ammonium vanadomolybdate (HANSON, 1950) or on the Technicon AutoAnalyzer using SALT's (1968) adaptation of the method of FOGG and WILKINSON (1958).

Potassium was determined, after dry ashing, by emission spectrometry using an EEL or Unicam flame spectrophotometer.

Calcium, magnesium and sodium were measured, also after dry ashing, by emission (Ca, Na) or atomic (Mg) spectrometry on a Unicam SP 900 flame spectrometer (SALT, 1967).

Soil analysis

Total nitrogen was determined by Kjeldahl digestion using $CuSO_4$ and Se as catalysts (BREMNER, 1960) ; ammonia released was determined after distillation.

Organic carbon was measured on soil ground < 0.5 mm by the rapid method described by WALKLEY (1947) using a correction factor of 1.35 or by the method of TINSLEY (1950).

Total phosphorus was determined on some early samples by digestion with $HClO_4$ (60 p. 100) ; most determinations were made, after fusion with Na_2CO_3 (MATTINGLY, 1970), by colorimetric estimations either manually (FOGG and WILKINSON, 1958) or by SALT's (1968) adaptation of the method of MURPHY and RILEY (1962).

Bicarbonate-soluble P was measured after extraction with 0.5*M* $NaHCO_3$ (OLSEN *et al.*, 1954) either manually, after neutralisation, by the $SnCl_2$-molybdate method (TRUOG and MEYER, 1929) or on the Technicon AutoAnalyzer (SALT, 1968).

0.01M calcium chloride soluble P was measured (usually using a 1:10 soil : solution ratio) as described by SCHOFIELD (1955) ; P was estimated either manually (TRUOG and MEYER, 1929) or on the Technicon AutoAnalyzer (SALT, 1968).

Exchangeable K and Mg were extracted from soils with N-ammonium acetate by the semi-micro method of METSON (1956) and K measured by emission and Mg by atomic absorption spectrometry on a Unicam SP 900 flame spectrophotometer. Exchangeable K was measured on some samples by successively extracting 6.25 g soil with N-ammonium acetate (250 ml).

Calcium carbonate was estimated manometrically (COLLINS, 1906 ; WILLIAMS, 1948) or, on a few samples containing little $CaCO_3$, by the method of TINSLEY, TAYLOR and MOORE (1951).

pH was measured using a glass electrode and a 1:2.5 soil : solution ratio either in water or 0.01 M $CaCl_2$.

RESULTS

The Agdell rotation experiment, Rothamsted

a) *Manuring and yields*

1848-1951. JOHNSTON and MATTINGLY (this Conference) have given reasons why LAWES and GILBERT made many of their experiments on crops grown in monoculture. However, in 1848, they started on Agdell field at Rothamsted an experiment which tested two crop rotations and three manurial treatments. There were six main plots, three each for the two rotations. One rotation was the traditional Norfolk four-course with swedes, barley, clover (or beans) and winter wheat (the 'clover rotation') ; in the other rotation a fallow replaced the legume crop (the 'fallow rotation '). Only one crop of the rotation was grown each year.

The manurial treatments were unmanured, P (changed to PKNaMg in 1884) and NPKNaMg ; the manures were applied once in four years to the swede crop. Nitrogen was applied as a mixture of ammonium salts and rape cake. Each fertiliser dressing supplied the following nutrients :

N, as ammonium salts, 48 kg N ha^{-1}.

N, as rape cake, 112 kg N ha^{-1} (in addition, each rape cake dressing supplied 22 kg P ha^{-1} and 22 kg K ha^{-1}).

P, as superphosphate, 32 kg P/ha^{-1} in 1848-95 and 42 kg P ha^{-1} in 1904-51, except in 1896 and 1900 when basic slag, 50 kg P ha^{-1}, was used.

K, as potassium sulphate, 130 kg ha^{-1} in 1848-95 and 220 kg K ha^{-1} in 1896-1951.

In addition, small dressings of Na and Mg, on average 22 kg Na ha^{-1} and 18 kg Mg ha^{-1}, were applied whenever K was given.

The traditional farming practice of the early 1800s was to let sheep eat the roots on the land when soil conditions permitted, thereby returning most of the nutrients for the benefit of the following crop of barley. The value of this practice was tested during 1848-1903 by halving the plots and removing the roots from one half while sheep ate those on the other half. LAWES and GILBERT (1894) discussed the results of this test.

Where ammonium salts were applied, the soils gradually lost $CaCO_3$ and became progressively more acid. After the 1930s yields of swedes were seriously diminished by clubroot (*Plasmodiophora brassicae*), which first appeared on the acid NPK treated plots but gradually spread to the other plots. Because of this disease, and

the irrelevance of the manuring to farming in the 1950s, the rotation experiment ceased after the barley harvest of 1951. WARREN (1958) described the experiment up to 1957.

Table 1 gives average yields of the five crops for three periods. The very poor yields of swedes in 1936-51 show how badly they were affected by disease. The two rotations gave similar yields of roots and cereals, the main advantage of the clover rotation being the extra produce as beans or clover.

TABLE 1

Agdell rotation : mean yields, 1848-1951

(WARREN, 1958 ; JOHNSTON and PENNY, 1972)

Period and crop	Fertiliser treatment and rotation					
	Unmanured		PK		NPK	
	Fallow	Clover	Fallow	Clover	Fallow	Clover
Swedes (roots, t ha^{-1})						
1852-99	3.2	1.8	20.6	21.5	37.4	36.5
1900-19	2.9	1.0	21.6	28.2	49.0	36.2
1936-51	1.3	0.4	7.8	8.2	7.1	4.9
Barley (1) (grain, t ha^{-1})						
1852-99	1.58	1.51	1.63	1.86	2.35	2.52
1900-19	0.98	0.93	1.18	1.44	1.43	1.96
1936-51	1.08	0.80	1.81	1.99	1.94	1.43
Clover hay (dry matter, t ha^{-1})						
1852-99	—	1.69	—	5.01	—	5.91
1900-19	—	0.71	—	2.73	—	1.55
1936-51	—	1.13	—	3.71	—	1.92
Beans (2) (grain, t ha^{-1})						
1852-99	—	0.93	—	1.24	—	1.66
Wheat (1) (grain, t ha^{-1})						
1852-99	1.98	1.77	2.28	2.38	2.33	2.50
1900-19	1.10	1.14	1.52	1.92	1.70	1.61
1936-51	1.84	1.49	2.43	2.45	2.09	2.43

(1) In all tables, yields of wheat and barley have been corrected to 85 p. 100 dry matter.

(2) Beans were only grown when the clover, undersown in the preceding barley, failed to grow satisfactorily.

In contrast to the small effect of crop rotation on yield there were large responses to the manurial treatments. Until 1919 PK fertilisers alone increased swede yields by 17-27 t ha^{-1}; adding N fertiliser gave further increases between 8-27 t ha^{-1}. Residues of N increased yields of barley which followed the roots by about 0.7 t ha^{-1} in 1852-99 and 0.4 t ha^{-1} in 1900-19 ; the effect was larger in the first period because

the yields given are averages of those obtained after feeding and after carting off the root crop. There were no residual effects of N on the winter wheat, the last crop grown after the application of manures to the swedes, but wheat obtained as much N from the soil after a fallow as it did from the residues of a bean or clover crop. Wheat yields were increased by the PK residues by between 0.3 and 0.6 t ha^{-1} (table 1).

1952-59. In this period no further P and K were given. Soil acidity was corrected by differential chalk dressings, the first given in winter 1953-54. Smaller dressings, applied in 1959 and 1967, raised the pH of the soil (in water) to pH 7.0 or more.

Good crops of beans were grown in 1956 without manures and of potatoes in 1957 with a uniform dressing of N on all plots (table 2). Residues from previous manuring increased bean yields by 1.76 t grain ha^{-1} and potato yields by 23.8 t ha^{-1}. (The design of the original experiment did not make it possible to separate the residual effects of P and K in these two years). In five of the six comparisons between the rotation with fallow and the rotation with clover the latter gave lower yields in the residual years, probably because less P and K remained in these soils due to the extra uptake by the legume crop. ARNOLD and CLOSE (1961) measured the release of non-exhangeable K from soils from the Agdell rotation in a glasshouse experiment using soils sampled in 1958.

TABLE 2

The effects, measured in 1956 and 1957, of the accumulated residues of fertilisers applied in the Agdell rotation experiment, 1848-1951

(WARREN, 1958)

Year	Crop	Fertiliser treatment and rotation, 1848-1951					
		Unmanured		PK		NPK	
		Fallow	Clover	Fallow	Clover	Fallow	Clover
1956	Beans (grain, t ha^{-1})	1.07	0.65	3.29	2.51	2.28	2.41
1957	Potatoes (total tubers, t ha^{-1})	11.0	7.5	36.2	21.6	38.9	35.4

1958-70. Because the PK residues increased yields of beans and potatoes so much their effects were investigated in greater detail. In 1958 each plot was halved and on one half, the value of both the P and K residues for grass was measured during 1958-70 (JOHNSTON and PENNY, 1972). On the other half-plot the effects of the P residues on the yields of barley, potatoes and sugar beet were measured during 1959-62 (JOHNSTON, WARREN and PENNY, 1970).

The experiment with arable crops measured only the P residues ; all crops were adequately manured with N and K. The yields for 1959-60 are summarised in table 3 ; in 1961-62 various methods of incorporating fresh dressings of new P were tested ;

the results were given in detail by JOHNSTON, WARREN and PENNY (1970) and are not discussed further here. The P residues more than doubled the yields of barley and potatoes and increased the yield of sugar by 70 p. 100 (table 3).

TABLE 3

Effect of P residues in the soil and a new dressing of 55 kg P ha⁻¹ on the yield of barley, potatoes and sugar beet grown on soils with and without P residues : Agdell rotation, 1959-60

(JOHNSTON, WARREN and PENNY, 1970)

	Soil unmanured since 1848	Soil enriched with P residues	Effect of P residues
Barley (grain, t ha^{-1})			
Without new P	1.54	3.41	1.87
With new P (1)	2.89	3.88	0.99
Response to new P	1.35	0.47	—
Potatoes (total tubers, t ha^{-1})			
Without new P	12.0	29.9	17.9
With new P(1)	25.4	38.2	12.8
Response to new P	13.4	8.3	—
Sugar beet (sugar, t ha^{-1})			
Without new P	3.38	5.77	2.39
With new P(1)	4.79	6.00	1.21
Response to new P	1.41	0.23	—

(1) New P 55 kg P ha^{-1}.

Fresh P dressings increased yield more on the impoverished than on the enriched soil *but* giving new P to the poor soils did not increase yields to equal those on enriched soils without new P.

The experiment with grass can be divided into two periods ; during the first, 1958-63, grass was given only N fertiliser. In the second, 1964-70, half-plots were divided to test fresh dressings of both P and K ; subplots testing P received basal dressings of N and K, subplots testing K received basal dressings of N and P. P was applied at 220, 440 and 880 kg P ha^{-1}, K at 260, 520 and 1 040 kg K ha^{-1}. Yields in 1963 were very small because the severe winter of 1962-63 killed much of the grass and they are omitted from the averages given in table 4. The P test ceased in autumn 1969, the K test in autumn 1970. During 1958-62 the grass yielded more on the fallow rotation plots than on the clover rotation plots because the fallow plots lost less P and K between 1848-1951. The annual gain from the PK residues, averaged over all treatments, was 3.47 t ha^{-1} of dry grass between 1958-62, *i.e.* PK residues doubled the yield obtained on the unmanured plots.

Results for 1964-70 show that when K but no P and P but no K were given,

treatments NP_0K_4 and NP_4K_0 respectively, the yields on the unmanured and PK plots had been restricted more by shortage of P than by K (table 4). The smallest dressings of fresh P and K both gave large increases in yield, ranging from 0.9 to 4.8 t ha^{-1} for the P dressing and 1.2 to 2.7 t ha^{-1} for the K dressing. When very large dressings of P and K were given (NP_4K_4), yields of grass on the old unmanured and PK plots were almost identical; the slightly larger yield on the old NPK plots was probably due to these plots being wetter than the rest of the field.

TABLE 4

Effect of P and K residues and fresh dressings of P and K on the yield of dry grass (t ha^{-1}) : *Agdell rotation, 1958-70*

(JOHNSTON and PENNY, 1972)

Period and treatment (1)	Fertiliser treatment and rotation, 1848-1951					
	Unmanured		PK		NPK	
	Fallow	Clover	Fallow	Clover	Fallow	Clover
1958-62						
N only	4.08	3.22	6.93	6.58	7.81	7.14
1964-70 (2)						
N P_0 K_4	4.18	3.09	6.10	5.10	8.04	6.64
N P_4 K_0	6.35	5.84	6.59	7.50	7.19	6.04
N P_1 K_4	7.81	7.88	8.38	8.27	8.96	8.67
N P_4 K_1	8.23	8.21	8.12	8.71	8.68	8.76
N P_4 K_4	8.36	8.24	8.31	8.53	9.16	8.98

(1) Treatments : N, 100 kg N ha^{-1} for each cut of grass,
P_1 and P_4, 220 and 880 kg P ha^{-1},
K_1 and K_4, 260 and 1 040 kg K ha^{-1}.
These dressings of P and K were applied only once, in spring 1964, but the amounts of P and K removed in the grass each year where P_1 P_4 K_1 K_4 treatments were given were replaced by equivalent P and K as fertilisers.

(2) The P test was stopped after the last cut of grass in 1969; the K test after the last cut in 1970.

1970-72. In 1964, when the large dressings of P and K were applied to subplots on the grass half of each plot, similar dressings were applied to subplots on the arable/fallow half-plots. These dressings equilibrated with the soil P and K during 1964-69. In addition, between 1958-69, soil organic matter increased in soils growing grass and decreased in soils which grew arable crops or were fallowed. The original six plots on Agdell had been sub-divided, by the end of 1969, into two groups, each of 48 subplots. The soils in one group contained different amounts of bicarbonate-soluble P, those in the other group contained different amounts of exchangeable K. The 48 plots in each group were divided into two sets, each of 24. In one set, the soils contained, on average, 1.4 p. 100 C, in the other 0.9 p. 100 C.

During 1970-72, an experiment was made on the soils with different amounts of soluble P, which ranged from 3 to 70 mg P kg^{-1}, to investigate relationships between yields of barley, potatoes and sugar beet and the bicarbonate-soluble P in soil and to measure responses of each crop to a dressing of fresh P. Two crops were grown each year and the dressings of fresh P, tested on sub-plots, were 27.5, 55 and 83 kg P ha^{-1} for the barley, sugar beet and potatoes respectively; these dressings were applied cumulatively to the plots during 1970-72. Results for the three crops grown on soils with most organic matter (1.4 p. 100 C) are in figure 1. The results show that there was a well-defined relationship between yield and amount of soluble P in soil for all three crops. Yields increased with increasing soil P up to about 20-25 mg

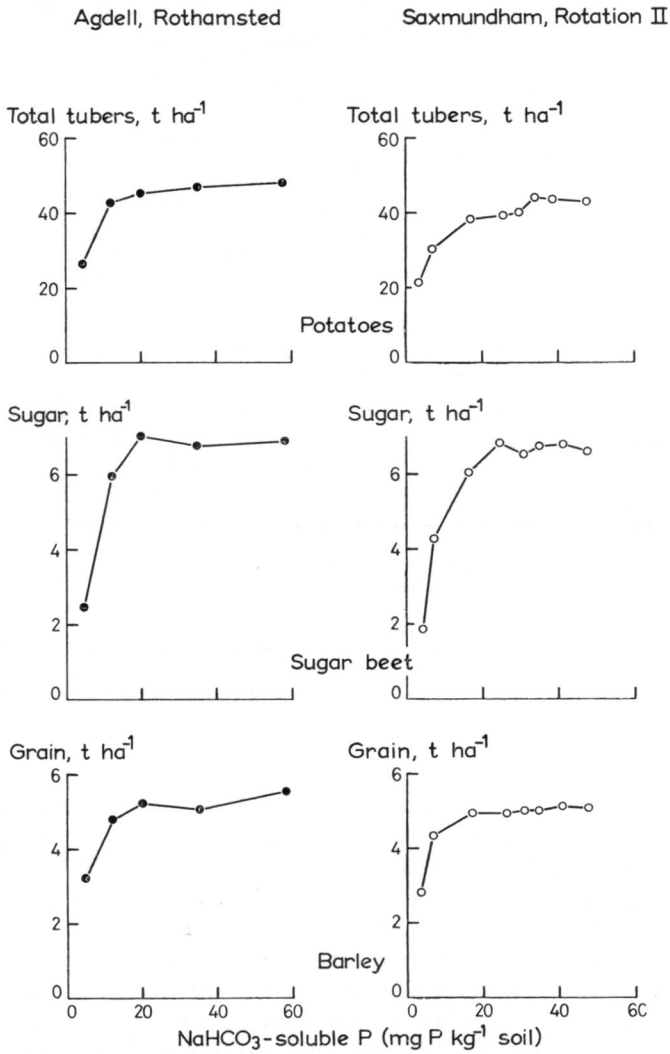


FIG. 1. — *Relationships between mean yields of potatoes, sugar and barley grain and $NaHCO_3$-soluble P in soils of the Agdell Rotation, Rothamsted* (1970-72) *and of Rotation II Saxmundham* (1969-74).

P kg^{-1}; above this level of soil P barley and sugar yields increased little but there were some further small increases in yields of potatoes. Table 5 gives the mean increases in yield from superphosphate applied before planting or sowing.

TABLE 5

Agdell rotation : increases in yields of potatoes, sugar and barley grain (1970-72) *from P applied as superphosphate* (1)

(Mean soil carbon = 1.4 p. 100 C)

$NaHCO_3$-soluble P in soil (mg P kg^{-1})	Increase (t ha^{-1}) in yield of		
	Potatoes	Sugar	Barley
4	+ 19.1	+ 3.46	+ 0.99
12	+ 5.2	+ 0.51	+ 0.30
.0	+ 3.5	+ 0.13	+ 0.09
35	+ 2.1	+ 0.04	+ 0.14
58	+ 5.5	— 0.18	— 0.21

(1) P applied = 83 kg P ha^{-1} (potatoes), 55 kg P ha^{-1} (sugar beet), 27.5 kg P ha^{-1} (barley).

On soils with less organic matter (0.9 p. 100 C) yields of barley on the old NPK plots were considerably smaller at all but the lowest levels of soil P, whereas yields of potatoes and sugar beet were not affected at either level of soil organic matter. We have already suggested that grass grown from 1964-69 probably yielded more on those soils than on others on Agdell because they were wetter. Differences between barley, and potatoes and sugar beet may be explained in the same way. Because soils of the old NPK plots tended to be wetter, barley grown on those plots was often drilled into a wetter seedbed than on the rest of the field and never recovered from this disadvantage. Potatoes and sugar beet, however, were always planted later when the soil had dried more and seedbeds were more uniform over the whole field.

b) *Nutrient removals.*

JOHNSTON and PENNY (1972) estimated the P and K additions to and removals from the soils of the Agdell experiment during 1848-1957. The balance, additions minus removals, and the mean annual change for each treatment are in table 6.

During 1959-60, when the value of the P residues for arable crops was tested, barley and potatoes took up 4.2 and 3.4 kg P ha^{-1} each year from the unmanured soils, about as much as had been taken up by the arable crops in the rotation experiment. The sugar beet removed rather more, about 7.8 kg P ha^{-1}, probably because it has a longer growing season and may remove P from the subsoil. All three crops took up more P from soils with residues and the extra P taken up (average 7.6 kg P ha^{-1}) represents an annual recovery of about 1.5 p. 100 of the P residues in the

soil at the end of the rotation experiment. It was impossible to estimate how much K might have been recovered from the residues because the crops received basal dressings of N and K.

TABLE 6

Gains and losses of P and K from Agdell soils, 1848-1951
(JOHNSTON and PENNY, 1972)

Gains and losses of P and K	Fertiliser treatment and rotation, 1848-1951					
	Unmanured		PK		NPK	
	Fallow	Clover	Fallow	Clover	Fallow	Clover
P (kg ha^{-1})						
Additions minus removals	— 325	— 356	+ 436	+ 217	+ 785	+ 632
Mean annual change	— 3.0	— 3.2	+ 4.0	+ 2.0	+ 7.1	+ 5.7
K (kg ha^{-1})						
Additions minus removals	— 1 199	— 1 454	+ 1 576	+ 595	+ 1 445	+ 788
Mean annual change	— 10.9	— 13.2	+ 14.3	+ 5.4	+ 13.1	+ 7.2

Growing grass during 1958-69, at first with N only, but later with NK dressings where P was tested and NP dressings where K was tested, provided an opportunity to estimate how much P and K these soils released over 12 years.

P removed.

Grass took up about as much P (4.6 kg ha^{-1}) from the unmanured soils in both periods ; this result agrees well with uptakes by arable crops. Much more P was taken up from the residues, on average 50.6 and 41.4 kg P ha^{-1} in the first and second six years respectively. The extra P (7.5 kg P ha^{-1}) taken up annually from the residues agrees well with the amount (7.6 kg P ha^{-1}) recovered by the arable crops in 1959-62. The annual recovery averaged about 1.6 p. 100 suggesting that, at this rate of release, the residues would last for about 60 years.

K removed.

Rather more K was removed in the second period than in the first (67 and 57 kg K ha^{-1} respectively) from the unmanured soil, probably because the grass benefited from the basal P fertiliser applied to these plots in the second period. However, the similarity between the K removals suggests that grass removed all the K available to it and that this soil, unmanured for more than 110 years, released about 60 kg K ha^{-1} annually. There were large differences in the amounts of K taken up from the residues in the two periods. On average, an extra 77 kg K ha^{-1} was taken up each year during the first six years but only 23 kg K ha^{-1} during the second seven-year period. In the second period the amounts of K removed were limited only by lack of K because at least twice as much K was removed from soils given fresh K dressings in this period. It seemed unlikely, therefore, that much more of the K residues would have been recovered if the experiment had continued, because the grass

removed so much less of them during 1964-70 than previously. However, only about 65 p. 100 of the estimated K residues were recovered by the grass and, if the size of the residues was reasonably estimated, the fate of this K requires explaining. It may simply have been leached out of the range of the roots. Alternatively, as release and fixation of K in soils are reversible reactions, some may have become fixed so that its rate of release is now no faster than of 'native' soil-K. A pot experiment, in which surface soils (0-23 cm) from the Agdell experiment, sampled in spring 1967, were cropped exhaustively with ryegrass showed that only about 70 p. 100 of the estimated K residues were recovered by ryegrass in 1289 days. These results (JOHNSTON and MITCHELL, 1974) are in good agreement with those obtained in the field experiment.

c) *Soil analysis and balance sheets.*

The manuring and cropping treatments have produced measurable differences in the N, P and K contents of the soils.

Nitrogen and carbon.

Table 7 gives the N contents of the soils (0-23 cm deep) in 1867, 1913 and 1958.

TABLE 7

Percentage total nitrogen in 0-23 cm depth of Agdell soil

Year	Treatment and rotation 1848-1951					
	Unmanured		PK		NPK	
	Fallow	Clover	Fallow	Clover	Fallow	Clover
1867	0.127	0.130	0.123	0.135	0.129	0.130
1913	0.118	0.141	0.122	0.148	0.127	0.147
1958	0.120	0.145	0.125	0.150	0.115	0.137

On soils of the fallow rotation the effects of time and manuring are similar to those on the Broadbalk soils (JOHNSTON and MATTINGLY, this Conference) with comparable fertiliser treatments, but the levels of soil nitrogen are all slightly larger on Agdell than on Broadbalk. The N content of the unmanured and PK-treated soils of the fallow rotation changed little over nearly 100 years. By 1913 there was a small increase in soil N (0.007 p. 100 N) on the NPK-treated soil partly due to the extra plant residues ploughed in each year, partly because some of the N was applied as rape cake. However, this increase in soil N was not maintained and, by 1958, this soil contained less N than the soil which had been unmanured for 90 years. Between 1913 and 1958 NPK-treated soils in the fallow and clover rotations lost 0.012 and 0.010 p. 100 N respectively. The reason is not known but may be related to the acidity which developed on these soils between 1913 and 1958.

Growing clover or beans once in four years, rather than fallowing the land, consistently increased soil N on both manured and unmanured soils (table 6). Twenty years after the start of the experiment the increase in soil N was small, on average

only 0.005 p. 100 N ; during the next 47 years there was a further build up of soil N and, in 1913, there was, on average, an extra 0.023 p. 100 N in the clover rotation soils. Between 1913 and 1958, no further soil N accumulated and, in 1958, soils from the clover rotation still contained an extra 0.024 p. 100 N. This probably represents an equilibrium value for the extra N in Rothamsted soil cropped with a legume rather than fallowed for one year in four. This extra N appears, however, to be present in very stable compounds which mineralize slowly because yields of barley, on soils receiving PK but no N fertilisers, were only increased slightly (0.14 t ha^{-1}) although the extra total N in soils from the clover rotation was 650 kg N ha^{-1}.

	PK plots	
	Fallow rotation	Clover rotation
Percentage N in soil, mean of 1913 and 1958 soils	0.124	0.149
Barley, grain t ha^{-1}, mean of 10 rotations 1913-51	1.32	1.46

After 12 years under grass the soil contained an extra 0.22 p. 100 C in the 0-23 cm depth of soil, an increase of 20 p. 100 on the 1958 values. Soils which grew arable crops for four years, and were then fallowed for eight, lost soil carbon, which decreased by about 24 p. 100 over 12 years, probably due to fallowing. Even in 1969 the carbon content of the soils was still smaller on the fallow than on the clover rotation.

A rotation experiment, not described here, compared the value of manures produced by animals given two different types of feed for crops grown in rotation at Woburn Experimental Station, Bedfordshire, from 1876-1911. The manures were compared with fertiliser dressings supplying equivalent amounts of NPKMg ; the experiment was considerably modified in 1911 and stopped in 1937. The results were described by VOELCKER (1936). The subsequent history of the site is known in detail and much has been learnt about changes in soil organic matter in this sandy loam soil due to cropping and manuring for nearly 100 years (MATTINGLY, CHATER and JOHNSTON, 1975). Unlike the Rothamsted soils in which the organic matter content has changed slowly or not at all, there has been a marked decrease in the organic matter in the light land at Woburn.

Phosphorus and potassium.

The mean annual P and K balance, additions of P or K minus removals of P or K, for the Agdell soils from 1848 to 1957 has already been given (page 752). These results are related to the bicarbonate-soluble P and the exchangeable K in soil respectively in fig. 2 which also compares other results from experiments at Rothamsted, Saxmundham and Woburn. These results are discussed further later in the paper.

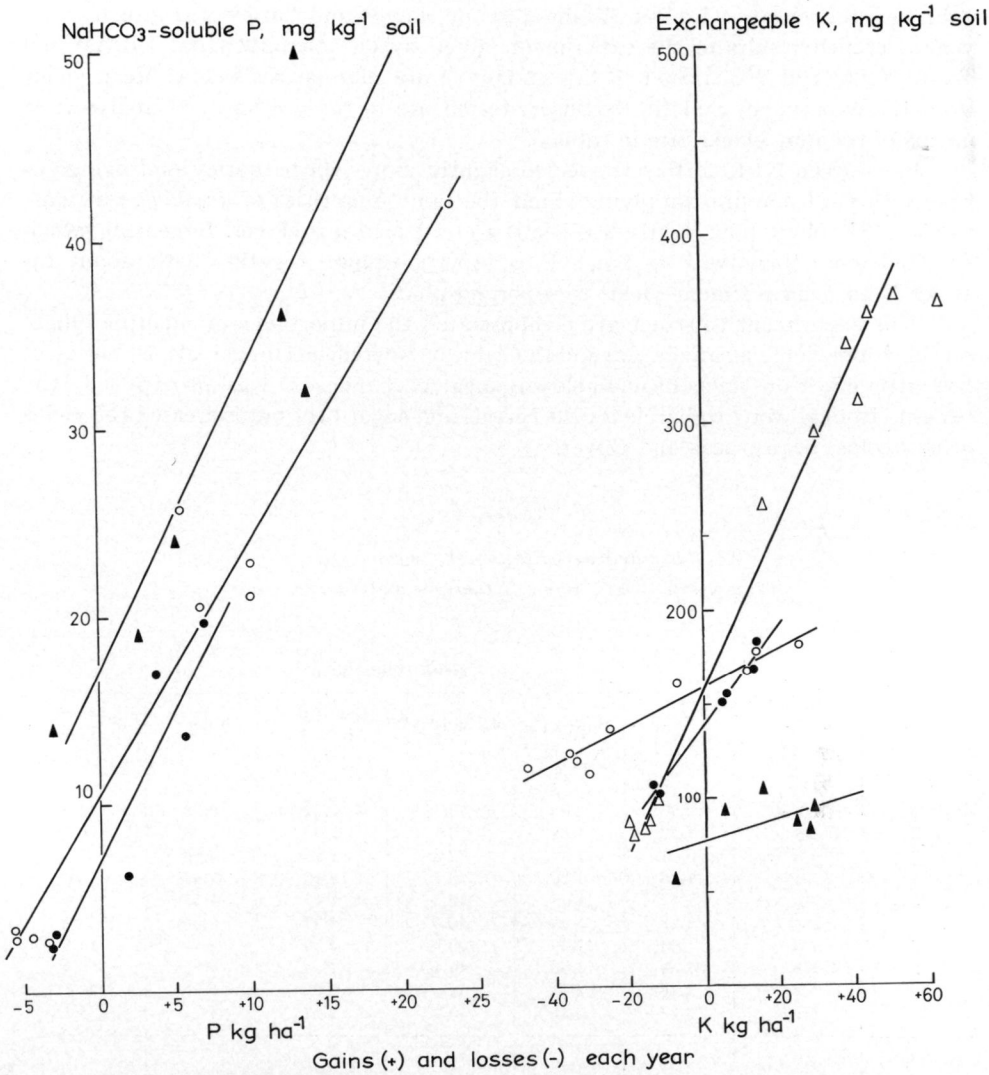


FIG. 2. — *Relationships between annual gains and losses of phosphorus and potassium* (kg ha^{-1}) *and* $NaHCO_3$-*soluble P and exchangeable K in soils* (0-23 cm) *from*

○ Saxmundham Rotation I, sampled in 1969
● Agdell Rotation, sampled in 1958
△ Broadbalk, Rothamsted, sampled in 1966
▲ Continuous Wheat and Barley, Woburn, sampled in 1956

Saxmundham, Rotation I

Manuring, yields and soil analyses.

1899-1965. This experiment tested all factorial combinations of N × P × K, together with plots given farmyard manure or bonemeal. The ten treatments occurred once in each block ; there were four blocks and each crop in a rotation of man-

golds, winter wheat, a legume (beans, peas or clover) and barley was grown every year. Detailed results of the experiment, given by OLDERSHAW (1941), BOYD and TRIST (1966) and WILLIAMS and COOKE (1971), are summarized below. Mean yields from the experiment and the fertilisers tested are in table 8 and soil analyses, as means of the four blocks, are in table 9.

Plots given NPK fertilisers yielded slightly more wheat, barley and mangolds than farmyard manure, supplying about the same quantities of *available* nutrients as the NPK plots, but slightly less beans and 2 t ha^{-1} less clover. Bonemeal, which supplied more than twice as much P as superphosphate, together with about 14-16 kg N ha^{-1}, gave similar yields to superphosphate.

This experiment convincingly demonstrated the importance of superphosphate on this P-deficient calcareous soil and the value of N fertilisers for cereals. N, however, had little effect on yields of mangolds or sugar beet unless P was also applied ; the benefits from K were negligible for the cereals and sugar beet but increased the yields of mangolds, beans, peas and clover.

TABLE 8

Saxmundham, Rotation I : mean yields

(TRIST and BOYD, 1966 ; WILLIAMS and COOKE, 1971)

Treatment	Manuring (1)	Mean yields (t/ha^{-1})					
		Winter wheat (2)	Barley (2)	Mangolds (3)	Beans and peas (4)	Clover (5)	Sugar beet (6) clean roots
1	FYM	2.37	2.03	42.7	2.72	9.98	32.9
2	Bonemeal	1.79	1.34	29.1	1.92	7.08	18.1
3	N	1.74	1.37	12.3	1.42	3.93	7.5
4	P	1.73	1.26	28.4	2.13	7.44	15.6
5	K	1.27	1.00	10.5	1.43	4.47	7.0
6	—	1.28	1.03	10.5	1.37	4.30	5.8
7	PK	1.83	1.39	30.4	2.52	8.47	15.1
8	NK	1.88	1.53	14.1	1.52	4.81	6.0
9	NP	2.38	2.13	42.7	2.12	7.10	24.1
10	NPK	2.43	2.26	45.2	2.61	7.84	25.1
Standard error		± 0.085	± 0.112	± 2.23	± 0.120	—	—
Mean		1.87	1.53	26.6	1.98	6.54	15.7

(1) FYM : 15 t ha^{-1} ; Bonemeal : 500 kg ha^{-1} ; N : sodium nitrate, 39 kg N ha^{-1} ; P : superphosphate 18 kg P ha^{-1} ; K : potassium chloride, 53 kg K ha^{-1}. (2) 1900-61 ; (3) 1906-61 ; (4) grown for 45 years between 1905-61 ; (5) grown for 15 years between 1902-47 ; (6) 1956-65.

During the first 50 years of the experiment yields of barley, wheat and mangolds grown with farmyard manure (treatment 1) or with full NPK manuring (treatment 10) were similar to, or better than, average yields in East Suffolk. Since 1950, however, yields declined, relative to the best yields obtained commercially, and the experiment stopped in 1964.

TABLE 9

Saxmundham, Rotation I : soil analysis, 0-23 cm, 1957
(COOKE, MATTINGLY and WILLIAMS, 1958)

Manuring (1)	$CaCO_3$ (%)	C (2) (%)	N (%)	P (3) (mg kg^{-1})	$NaHCO_3$-soluble P (mg kg^{-1})	Exchangeable K (mg kg^{-1})
FYM	0.72	2.09	0.199	748	33.4	268
Bonemeal	0.74	1.36	0.149	923	7.6	109
N	0.76	1.24	0.136	455	2.8	124
P	0.74	1.34	0.139	601	22.7	116
K	0.88	1.28	0.137	448	2.4	235
—	0.83	1.27	0.135	454	2.5	137
PK	0.91	1.36	0.142	596	19.5	180
NK	0.89	1.28	0.139	446	2.4	205
NP	0.82	1.40	0.146	602	20.8	110
NPK	1.01	1.36	0.144	603	18.8	154
Mean	0.83	1.40	0.147	588	13.3	164

(1) See table 8 ; (2) P. 100 C : 1.35 × (WALKLEY, 1947) value ; (3) corrected to values by fusion analysis (MATTINGLY, 1970).

TABLE 10

Saxmundham, Rotation I : mean yields, 1966-69
(WILLIAMS and COOKE, 1971)

Treatment	Manuring (1)	Mean yields (t ha^{-1})			
		Winter wheat	Barley	Sugar	Beans
1	FYM (2)	4.42	3.63	6.89	3.10
2	Bonemeal	1.93	1.29	2.25	1.77
3	N_2P_2	4.19	3.78	6.76	2.06
4	N_1P_1	3.65	3.16	5.33	2.02
5	N_1P_2K	3.58	2.79	5.38	2.01
6	N_1P_2	3.45	3.09	5.62	2.11
7	N_1P_1K	3.79	3.15	6.31	2.61
8	N_2P_2K	4.69	3.68	6.73	2.54
9	N_2P_1	4.35	4.00	6.74	2.12
10	N_2P_1K	4.42	3.80	6.73	2.67
Mean	—	3.85	3.24	5.87	2.30

(1) FYM : 30 t ha^{-1} ; bonemeal : 500 kg ha^{-1} ; N : ammonium nitrate-limestone, N_1 and N_2 : 63 and 126 kg N ha^{-1} ; P as superphosphate, P_1 and P_2 : 22 and 44 kg P ha^{-1} ; K as potassium chloride : 104 kg K ha^{-1}.

(2) In all years, except 1966, 63 kg N ha^{-1} was applied in addition to FYM.

(N manuring included one or two top dressings in 1967-69, see WILLIAMS and COOKE, 1971).

1966-69. The experiment was redesigned in 1965-66 but the original manuring was retained on a small area (30 m^2) of each main plot. WILLIAMS and COOKE (1971) state : « In 1965 we saw no point in continuing the demonstration on whole plots that unfertilised crops at Saxmundham yield little, that phosphate fertiliser is essential and that nitrogen is needed for all crops but legumes ». Nine out of ten main-plot treatments were modified but the amount of bonemeal (treatment 2) remained unchanged to provide a control plot. Yields between 1966-69 on the small areas of each plot which were cropped with unchanged manuring were similar to long-term averages (table 8), and are not given here. Table 10 gives the new treatments and the yields they produced between 1966-69.

The new manuring tested from 1966-69 raised yields of wheat, barley and sugar beet up to and, in several years, well above national average yields. Most of the benefit came from the larger amounts of N and P applied between 1966-69 ; 44 kg P ha^{-1} applied to plots where none had been given before 1965 gave almost as large crops (table 10) as plots which had received 22 kg P ha^{-1} since 1899. At least 126 kg N ha^{-1}, applied late in March or early in April, was needed by wheat, barley and sugar beet and these crops benefited, in the wet summers of 1967 and 1969, from top-dressings providing 63 kg N ha^{-1}. Potassium fertilisers had little effect on yields of wheat and barley but, as in 1899-1965, they slightly increased the yield of beans.

WILLIAMS and COOKE (1971) comment that the seasonal variations in yield did not seem to be related to differences in air temperature in different years and that poor yield seemed associated with i) wet autumns which delayed ploughing and resulted in poor soil conditions and ii) wet springs which leached nitrate. The problems of cultivations and soil structure on the Chalky-Boulder clay soils at Saxmundham are discussed elsewhere (COOKE and WILLIAMS, 1972). The influence of rainfall on nutrient losses from the soils at Saxmundham is described by WILLIAMS (1976).

Yields of grass and lucerne.

1970-76. All plots were divided transversely and one-half of each plot was sown in spring, 1970 with lucerne and the other with a mixture of timothy and meadow fescue. The P and K manuring during the period 1970-74 was the same as in 1966-69. All treatments growing grass were given 100 kg N ha^{-1} for each cut (usually two each year) ; no N was given to lucerne. Mean yields of grass and lucerne were remarkably similar (table 11) and ranged from 8.6-12.1 t ha^{-1} for grass and from 8.5-13.0 t ha^{-1} for lucerne over four years. The mean increase in yield from K was 0.64 t ha^{-1} for grass and 0.86 t ha^{-1} for lucerne. Phosphorus had no effect on yields of grass but slightly increased lucerne yields by 0.16 t ha^{-1}. Fresh dressings (1970-74) plus residues from previous phosphate manuring (1966-69) which, by 1969, had increased the amounts of soluble P in the soils to 11 mg P kg^{-1}, were adequate to maintain yields. The mean exchangeable K in soils previously unmanured, was 126 mg K kg^{-1} and yields of both crops were increased by 6-9 p. 100 from freshly applied potassium chloride.

Nutrient uptakes by grass and lucerne.

The total amounts of N removed by grass were little affected by the amounts of P and K applied ; about 150 kg N ha^{-1} was removed each year in grass on plots given fertilisers and about 180 kg N ha^{-1} from the plot given farmyard manure.

Grass recovered about 60 p. 100 of the applied fertiliser nitrogen. The lucerne crop removed about 260 kg N ha^{-1} and, without any fertiliser N, slightly outyielded the grass. Neither P nor K fertilisers affected the uptake of nitrogen.

TABLE 11

Saxmundham Rotation I : mean yields of, and uptakes of N and K by, grass and lucerne, 1971-74

Treatments	Manuring (1)	Yields (t ha^{-1})		Uptakes (kg ha^{-1})			
				Grass		Lucerne	
		Grass	Lucerne	N	K	N	K
1	FYM	11.17	11.10	181	281	273	209
2	Bonemeal	9.16	9.43	150	176	254	118
4 and 9	P_1	9.36	9.28	154	181	259	113
3 and 6	P_2	9.36	9.41	153	185	260	114
7 and 10	P_1K	10.00	10.12	157	250	271	197
5 and 8	P_2K	10.00	10.30	152	256	268	210
Mean		9.78	9.88	156	220	264	160

(1) FYM : 60 t/ha^{-1} applied in 1970 ; bonemeal : 500 kg/ha^{-1} ; for P and K manuring, see table 10. N manuring (to grass only) : 100 kg N ha^{-1} for each cut.

Grass grown on soil which had received no K for 70 years took up, on average, 180 kg K ha^{-1}, about three times the amount removed annually by grass grown for 12 years on unmanured soils of the Agdell Rotation at Rothamsted. A major objective of the present modification of the Rotation I experiment at Saxmundham is to establish how long this Chalky-Boulder clay soil, typical of many in Eastern England, continues to release so much potassium. The annual application of 104 kg K ha^{-1} increased grass yields by 0.64 t ha^{-1} and K uptakes to about 250 kg K ha^{-1}, an apparent recovery of 70 p. 100. More K, about 280 kg ha^{-1}, was removed annually from soils given annual dressings of farmyard manure before 1970.

Lucerne removed about one-half as much K as grass from the unmanured soils, although yields of both crops were almost the same (table 11), and recovered about 86 p. 100 of the K applied ; this suggests that lucerne uses soil K less efficiently than grass but recovers more of the K applied to it as fertiliser.

The amounts of N taken up by the grass represent a recovery of about 60 p. 100 of the N applied. Only about 20 kg N ha^{-1} are lost in drainage water from these soils (WILLIAMS, 1976) ; the fate of the remainder is unknown. If the N unaccounted for is lost by denitrification, then this represents a total loss to the farming system. If the N is incorporated into soil organic matter, it may become available again particularly after the grass is ploughed. We shall measure changes in soil organic matter over a number of years to account for gains or losses of soil N in this experiment.

Saxmundham, Rotation II

Manuring, yields and soil analyses.

1899-1964. This experiment was designed to determine how farmers could best use limited amounts of FYM (25 t ha^{-1}) and whether they could profitably use more N and P fertiliser in a four-course rotation, similar to Rotation I. Fertilisers and FYM were applied to different crops in the rotation and not to every crop as in Rotation I. Results were summarized by OLDERSHAW (1941) and BOYD and TRIST (1966); table 12 gives the fertiliser treatments and yields between 1900-52.

Best yields of wheat, mangolds and barley were achieved using treatments 8-10 to which most fertiliser was applied. BOYD and TRIST (1966) commented that this experiment provided clear evidence that superphosphate raised yields of *all* crops in the rotation, not only those to which it was applied. It must, therefore, be numbered among the earliest experiments in England that clearly demonstrate the residual value of phosphate fertilisers.

TABLE 12

Saxmundham, Rotation II : manuring and mean yields, 1900-1952
(BOYD and TRIST, 1966)

Treatment	Winter wheat		Mangolds		Barley		Beans	
	Manuring	Grain (t ha^{-1})	Manuring	Roots (t ha^{-1})	Manuring	Grain (t ha^{-1})	Manuring	Grain (t ha^{-1})
1	—	1.47	—	11.8	—	1.15	—	1.57
2	FYM	2.00	—	28.4	—	1.48	—	2.08
3	FYM	2.22	NP	48.5	—	1.68	—	2.59
4	NP	2.45	FYM	46.2	—	1.76	—	2.77
5	N	2.46	FYM	47.2	—	1.78	P	2.84
6	FYM + N	2.64	P	44.2	—	1.78	—	2.71
7	FYM	2.30	P	44.4	N	2.31	—	2.75
8	FYM	2.36	NP	54.5	1/2 P	1.93	1/2 P	2.86
9	FYM + N	2.67	NP	53.2	N	2.31	—	2.71
10	N	2.45	NP	49.5	N	2.17	FYM	3.06
Mean		2.30		42.8		1.83		2.59

FYM : 25 t ha^{-1} ; N : sodium nitrate, 29 kg N ha^{-1} (19.5 kg N ha^{-1} before 1921) ; P : superphosphate, 60 kg P ha^{-1} (40 kg P ha^{-1} before 1921).

1965-68. Much of the experiment was discontinued after harvest in 1952, but treatments 1-7 were continued unchanged on two of the four blocks until 1964. These 14 plots, together with two plots (treatment 8), which had received extra P until 1952, have been used since 1965 to evaluate the residues of P accumulated since 1899. Each of the 16 plots was divided into two in 1964 and the experiment has been continued since then in four blocks (MATTINGLY, JOHNSTON and CHATER, 1970).

Adequate N and K fertilisers were applied from 1965-68 but no further P was

TABLE 13

Saxmundham, Rotation II : manuring, mean yields, 1965-68 and $NaHCO_3$-soluble P in soils in 1968

(MATTINGLY, JOHNSTON and CHATER, 1970)

Treatment	Manuring (1) (1899-1964)	Barley, 1965		Potatoes, 1966		Sugar beet, 1967		Barley, 1968		$NaHCO_3$-soluble P (mg P kg^{-1})
		Manuring (2)	Grain (t ha^{-1})	Manuring (3)	Tubers (t ha^{-1})	Manuring (4)	Sugar (t ha^{-1})	Manuring (5)	Grain (t ha^{-1})	
1	None	NK	2.00	NK	18.7	NK	3.29	NK	3.04	3
2	FYM	NK	3.93	NK	36.6	NK	5.96	NK	3.73	7
3	FYM + P	NK	4.34	NK	42.3	NK	7.45	NK	4.30	21
4	FYM + P	NK	4.29	NK + FYM	51.4	NK + FYM	8.43	NK	4.02	39
5	FYM + P	NP_1K	4.30	NP_1K + FYM	51.1	NP_1K + FYM	8.45	NK	3.90	54
6	FYM + P	NP_1K	4.28	NP_1K	45.8	NP_1K	7.96	NK	3.94	44
7	FYM + P	NP_2K	4.17	NP_2K	46.7	NP_2K	8.08	NK	4.10	67
8	FYM + 2 P	NK	3.94	NK	40.9	NK	7.54	NK	4.04	28

(1) See table 12 for details of manuring 1899-1964.
N as ammonium nitrate-limestone, P as triple superphosphate, K as potassium chloride.
(2) N : 100 kg N ha^{-1} ; P_1 : 82.5 kg P ha^{-1}, P_2 : 165 kg P ha^{-1} ; K : 104 kg K ha^{-1}.
(3) FYM : 50 t ha^{-1} ; N : 150 kg N ha^{-1} ; P_1 and P_2 as above ; K : 208 kg K ha^{-1}.
(4) FYM : 50 t ha^{-1} ; N : 150 kg N ha^{-1} ; P_1 and P_2 as above ; K : 125 kg K ha^{-1}.
(5) N : 94 kg N ha^{-1} ; K = 50 kg K ha^{-1}.

given in treatments 1, 2, 3 or 8. Table 13 shows how additional FYM totalling 100 t ha^{-1} and supplying about 230 kg P ha^{-1} was given in treatments 4 and 5 and triple superphosphate, supplying a total of about 250 and 500 kg P ha^{-1}, was given in treatments 5, 6 and 7.

Table 13 gives the yields of three crops grown between 1965 and 1968. Yields of barley, given adequate N and K, were almost doubled by the residues from P manuring in 1965 and increased by 30-40 p. 100 in 1968. Fresh applications of superphosphate did not increase them further. Residues of superphosphate (treatment 3) increased yields of potatoes in 1966 by 23.6 t ha^{-1} and of sugar in 1967 by 4.16 t ha^{-1}. Yields of both crops were slightly larger where fresh FYM was also given.

1969-74. At the end of 1968 the experiment consisted of eight treatments arranged in 32 plots. The amounts of P in the soils had been increased in treatments 4, 5, 6 and 7 by FYM and superphosphate applied between 1965-67 and $NaHCO_3$-soluble P in the soils in 1968 ranged from 3-67 mg P kg^{-1} (table 13). From 1969-74 the experiment was cropped in a rotation of potatoes-barley-sugar beet-barley; all crops were present each year, one per block. The 32 plots were divided into five micro-plots ; no P was given to two micro-plots and three rates of superphosphate, supplying 27.5, 55 and 83 kg P ha^{-1}, were applied to potatoes or sugar beet on the other micro-plots. No phosphate was given between 1970-73 to barley, which measured residues of the P dressings given to the roots.

Mean yields of potatoes (total tubers) and of sugar from plots without fresh P are given in fig. 1, plotted against the mean $NaHCO_3$-soluble P measured each spring before planting. Potatoes yielded about 39 t ha^{-1} on plots containing 25 mg P kg^{-1} $NaHCO_3$-soluble P and about 43.5 t ha^{-1} on the most enriched soils (39-47 mg P kg^{-1} $NaHCO_3$-soluble P), an increase of about 0.2 t ha^{-1} for each one mg kg^{-1} increase in $NaHCO_3$-soluble P in the soil. Results with sugar beet were different and mean yields of sugar were almost constant (6.54-6.70 t ha^{-1}) on soils containing more than 25 mg P kg^{-1} $NaHCO_3$-soluble P. Yields of barley increased only slightly (4.87 to 5.12 t ha^{-1}) when grown on soils containing more than 25 mg P kg^{-1} $NaHCO_3$-soluble P.

TABLE 14

Saxmundham, Rotation II : increases in yields of potatoes and sugar (1969-74) from P applied as superphosphate (55 kg P ha^{-1}) *and of barley grain* (1970-73) *from the residues of superphosphate*

Treatment	Mean $NaHCO_3$-soluble P in soil (mg P kg^{-1})	Increase (t ha^{-1}) in yield of		
		Potatoes	Sugar	Barley
1	4	+ 12.5	+ 3.59	+ 1.92
2	7	+ 8.2	+ 1.39	+ 0.48
3	16	+ 4.3	+ 0.66	— 0.18
8	25	+ 4.2	— 0.38	+ 0.04
4	30	+ 4.3	— 0.14	+ 0.04
6	34	+ 0.2	+ 0.23	+ 0.08
5	40	+ 1.3	— 0.09	— 0.14
7	48	+ 2.5	+ 0.40	— 0.11

Table 14 gives the mean responses to fresh superphosphate applied at an average dressing of 55 kg P ha^{-1} for potatoes and sugar beet and the residual effects of this phosphate for the following barley crop. For potatoes, the responses decreased as the soluble P in the soil increased from 4 to 47 mg P kg^{-1} but were always positive. The mean increase on soils containing more than 25 mg P kg^{-1} $NaHCO_3$-soluble P was 2.5 t/ha^{-1} of tubers. For sugar beet, however, the extra sugar produced by fresh superphosphate decreased rapidly and, on soils containing more than 25 mg P kg^{-1} $NaHCO_3$-soluble P the mean response was negligible. For barley, residues of phosphate applied to the root crops increased yields on the impoverished soils (treatments 1 and 2) but not on soils containing more than 17 mg P kg^{-1} $NaHCO_3$-soluble P.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Soil analysis and exchangeable and non-exchangeable P and K in soils

The accounts of the three rotation experiments described here have been largely restricted to summaries of the yields obtained since they started together with some indications, especially for the Agdell rotation, of how and why these experiments have been successively modified. This section discusses briefly the purpose of the soil analysis and its relevance to crop growth on the soils at Rothamsted, Saxmundham and Woburn.

Changes in the nutrient concentrations in soils from all the old rotation experiments have been influenced not only by the net gains and losses from the amounts of fertiliser supplied or removed by crops but also by the depth of ploughing and soil sampling which was increased from about 20 cm to 25 cm in both Rotations I and II at Saxmundham in 1964-65. This decreased the nutrient concentrations in all soils by 10 p. 100 or more ; reliable balance sheets could still be obtained, however, by converting nutrient concentrations (in mg kg^{-1}) to the amounts present in kg nutrient ha^{-1} (MATTINGLY, JOHNSTON and CHATER, 1970). Residues of FYM and superphosphate applied to treatments 4, 5, 6 and 7 on Rotation II from 1965-67 (table 13) did not increase the total P content of the soil, because they were distributed throughout more soil in 1968 than in 1964. However, the gains in total P in the soil to 25 cm (calculated in kg ha^{-1}) agreed closely with the amounts of the residues remaining in the soil. Increases in $NaHCO_3$-soluble P were about 10 p. 100 of the increases in total P for residues accumulated between 1899-1964 and 25 p. 100 for residues of recent (1965-67) applications of superphosphate (MATTINGLY, JOHNSTON and CHATER, 1970).

The results of soil analyses from the Agdell rotation show clearly that residues of PK fertilisers accumulated in the soils between 1848 and 1951 and were available to subsequent crops (e. g. table 2). In this experiment the increase in $NaHCO_3$-soluble P was about 6 p. 100 of the increase in total P in the soil and the increase in exchangeable K about 14 p. 100 of the estimated amount of the residues remaining from K manuring. Cropping with grass from 1958-69 (table 4) removed about 56 kg P ha^{-1} from the unmanured soils which hardly changed the amounts of $NaHCO_3$-soluble P they contained. Grass grown on soils containing PK residues from ferti-

lisers applied between 1848 and 1951 removed about 148 kg P ha^{-1}. The mean $NaHCO_3$-soluble P decreased between 1958 and 1969 by 6.4 mg P kg^{-1}, equivalent to only 16.8 kg P ha^{-1} or 11 p. 100 of the total P used by the grass.

Results with K were similar ; grass removed about 810 kg K ha^{-1} in 12 years from the unmanured soils but exchangeable K in the soils changed very little. Grass removed 1 430 kg K ha^{-1} from soils containing residues ; the mean exchangeable K in the soils decreased by 34 mg K kg^{-1}, equivalent to a removal of 89 kg K ha^{-1} or 6 p. 100 of the total K removed. Much non-exchangeable K and non-bicarbonate soluble P was used by grass between 1958 and 1969.

The modifications to the Agdell rotation and Saxmundham Rotation II experiments have both produced soils containing a range of soluble P which were used to test : *a*) the response of potatoes, sugar beet and barley to increasing levels of soluble P and *b*) the response of each crop (except barley at Saxmundham) to fresh superphosphate broadcast before planting or sowing (fig. 1 ; table 5 and 14). Other evidence (JOHNSTON, MATTINGLY and POULTON, 1976) shows that in experiments at Woburn crop yields and responses to applied P depend on the amount of soil organic matter in the soils. We have, therefore, restricted comparisons between results from Saxmundham and the Agdell rotation to soils containing about the same total carbon (1.4 p. 100 C). Both soils behaved similarly (fig. 1) and, at both sites, potatoes benefited from freshly-applied superphosphate even on soils containing more than 40 mg P kg^{-1} $NaHCO_3$-soluble P (tables 5 and 14). Neither sugar beet nor barley, however, gave consistently larger yields when fresh superphosphate was applied on soils containing more than 25 mg P kg^{-1} $NaHCO_3$-soluble P. The monocalcium phosphate potential ($1/2\ pCa + pH_2PO_4$), suggested by SCHOFIELD (1955) as 'the function most likely to give a numerical index of the condition in the soil which mainly controls the availability of phosphate', is closely correlated with $NaHCO_3$-soluble P in both Agdell and Saxmundham soils and is linearly related to the amounts of P applied to Rotation II (MATTINGLY, JOHNSTON and CHATER, 1970).

Much of the data from the P and K analyses of soils from the Agdell rotation, Rotation I at Saxmundham (WILLIAMS and COOKE, 1971) and the Broadbalk and Continuous Wheat and Barley experiments at Woburn (JOHNSTON and MATTINGLY, this Conference) is related to net gains by or losses from the soils (fig. 2). This shows that soils at Rothamsted and Saxmundham will contain between 7 and 10 mg $NaHCO_3$-soluble P kg^{-1} soil when removals in the crops are just balanced by additions of fertiliser-P. The corresponding value for the soils at Woburn is much higher ($\approx$ 17 mg P kg^{-1}).

When K removed in crops is just balanced by K added as fertiliser, the three soils from Agdell, Saxmundham and Broadbalk all contain about 150 mg exchangeable K kg^{-1}. The lighter soils at Woburn, for which the relationship is less well-defined, contain much less exchangeable K ($\approx$ 80 mg K kg^{-1}).

Relationships of this kind, which are readily obtained from long-continued field experiments, provide a simple means of using the net gains of P or K from manuring to estimate approximately the amounts of $NaHCO_3$-soluble P or exchangeable K that will accumulate in different soils. *They do not, however, give any clear indications of the non-exchangeable reserves of P or K in the soils.* There is now an

important need to devise simple tests that will estimate quantitatively reserves of P and K which are available to crops but are not measured as $NaHCO_3$-soluble P or exchangeable K in soils.

Reçu pour publication en mai 1976.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank J. H. A. DUNWOODY for the statistical analyses, P. R. POULTON for some ot the soil and crop analyses and Mrs. JOYCE MUNDEN for preparing the figures.

RÉSUMÉ

EXPÉRIENCES DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE SUR ROTATIONS DE CULTURE DANS LES STATIONS EXPÉRIMENTALES DE ROTHAMSTED ET DE SAXMUNDHAM : EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LES RENDEMENTS ET L'ANALYSE DES SOLS, BUT ET PLAN DES MODIFICATIONS INTRODUITES RÉCEMMENT

Ce mémoire décrit les résultats de trois expériences de fertilisation sur assolement dans le sud de l'Angleterre, ainsi que les modifications qui y ont été introduites au cours de la période récente.

L'expérience la plus ancienne, celle de l'assolement sur le champ désigné par 'Agdell', a été mise en place à la *Station Experimentale de Rothamsted* en 1848 et a continué, presque sans modifications, jusqu'en 1951. Elle comparaît deux rotations quadriennales : *a*) rutabagas, orge, trèfle (ou fèves) et blé d'hiver, et *b*) rutabagas, orge, jachère et blé d'hiver. Les traitements fertilisants étaient les suivants : sans engrais, engrais PKNaMg et engrais NPKNaMg appliqués une fois tous les quatre ans aux rutabagas. Il n'y avait que six parcelles et une seule culture était présente chaque année. De 1952 à 1957 le champ a été mis soit en jachère soit sous culture uniforme, et les sols acides ont été chaulés. L'effet résiduel des engrais appliqués précédemment a augmenté le rendement des fèves, cultivées sans engrais, de 1,76 t de grains/ha^{-1} en 1956, et celui des pommes de terre, ayant reçu un traitement uniforme d'azote en 1957, de 23,8 t/ha^{-1}. En 1958 chaque parcelle a été divisée en deux ; sur l'une des deux moitiés, la valeur des engrais P et K résiduels a été évaluée sur prairie de 1958 à 1970. Sur l'autre moitié, de 1959 à 1962, on a mesuré les effets résiduels de P sur les rendements de l'orge, des pommes de terre et de la betterave sucrière. Les engrais P résiduels ont plus que doublé les rendements de l'orge et des pommes de terre et ont augmenté le rendement en sucre de 70 p. 100.

Entre 1964 et 1970 on a modifié le plan de l'expérience en appliquant des doses de P de 220, 440 et 880 kg de P ha^{-1}, et des doses de K de 260, 520 et 1 040 kg de K/ha^{-1}. Les rendements sur les parcelles sans engrais et sur les parcelles PK de l'assolement original ont été limités plus par le manque de P que par celui de K. Les plus basses doses des nouvelles applications de P et K ont, dans les deux cas, produit une importante augmentation des rendements, s'étalant de 0,9 à 4,8 t/ha^{-1} pour P et de 1,2 à 2,7 t/ha^{-1} pour K. Aux plus fortes doses de P et K, les rendements des prairies sur les anciennes parcelles sans engrais et sur les anciennes parcelles PK ont été presque identiques. De 1970 à 1972, les sols contenaient 3 à 70 mg de P (soluble dans $NaHCO_3$) par kg de sol. On a mis en évidence une relation bien définie entre les rendements de l'orge, de la betterave sucrière et des pommes de terre d'une part, et le contenu en P soluble des sols d'autre part. Les rendements ont augmenté avec l'accroissement en P soluble des sols jusqu'à 20-25 mg P/kg^{-1} ; au-dessus de cette valeur, les rendements de l'orge et de la betterave sucrière ont à peine augmenté, tandis que ceux des pommes de terre ont continué à croître légèrement.

Deux expériences d'assolement ont été mises en place à la *Station Expérimentale de Saxmundham* dans le comté du Suffolk en 1899.

La première (*Rotation I*) consistait en une rotation quadriennale blé, betterave fourragère, orge et une légumineuse (fèves, pois ou trèfle). La fumure, appliquée tous les ans, comprenait le fumier de ferme, les cendres d'os et toutes les combinaisons de N, P et K. Il y avait quatre répétitions de dix traitements et chaque culture était présente tous les ans. L'expérience a continué sans modifications jusqu'en 1965. Les parcelles ayant reçu NPK ont produit légèrement plus de blé, d'orge et de betteraves fourragères que les parcelles avec fumier à dose à peu près égale en éléments fertilisants, mais légèrement moins de fèves et moins de trèfle (2 t ha^{-1}). Les cendres d'os, qui apportaient environ deux fois plus de P que le superphosphate, en même temps que 4-16 kg N ha^{-1}, ont produit des rendements semblables à ceux obtenus avec le superphosphate. L'expérience a démontré l'importance des engrais phosphatés sur sol calcaire carencés en P ainsi que la valeur des engrais azotés pour les céréales. En l'absence de P, l'azote a eu une influence négligeable sur les rendements des navets et de la betterave sucrière. Sur ce sol, les céréales et la betterave sucrière ont peu bénéficié des applications de K, mais celles-ci ont augmenté les rendements des betteraves fourragères, des fèves, des pois et du trèfle.

En 1965-1966, on a modifié le plan de l'expérience en doublant la dose de fumier et en introduisant des doses plus élevées de N, P et K. Entre 1966 et 1969, les nouveaux traitements ont élevé les rendements du blé, de l'orge et de la betterave sucrière au niveau ou au-dessus de la moyenne nationale. Les bénéfices étaient dus, en grande partie, aux doses plus élevées de N et P. Le K additionnel a produit peu d'effet sur le rendement des céréales mais a légèrement augmenté celui des fèves. De 1970 à 1974, des demi-parcelles ont été consacrées à la culture de prairies (mélange de fétuque et de fléole des prés) recevant 100 kg N/ha^{-1} par coupe, ou de la luzerne avec le même traitement PK qu'en 1966-1969. Les rendements moyens ont varié de 8,6 à 12,1 t ha^{-1} pour les prairies et de 8,5 à 13,0 t ha^{-1} pour la luzerne. Les engrais potassiques ont augmenté les rendements de la prairie de 0,64 t ha^{-1} et ceux de la luzerne de 0,86 t ha^{-1}. Le superphosphate n'a exercé qu'une influence insignifiante.

Dans la *Rotation II*, l'expérience a porté sur le même assolement quadriennal que dans la Rotation I mais la fumure a varié avec la culture. L'expérience avait pour but de déterminer comment des doses restreintes de fumier et d'engrais N et P pourraient être le plus profitablement utilisées par les quatre cultures. Elle a continué sans modifications jusqu'en 1952 et, sur certaines parcelles, on a poursuivi le même plan de fumure jusqu'en 1964. De 1965 à 1974, ce champ d'expérience a servi à étudier l'effet résiduel du fumier et des engrais P appliqués : *a*) entre 1899 et 1964, et *b*) entre 1965 et 1967. L'effet résiduel de la fumure appliquée de 1899 à 1964 s'est traduit par un doublement des rendements de l'orge en 1965 (N et K étant fournis en dose suffisante) et par une augmentation de ceux-ci de 30 à 40 p. 100, en 1968. L'effet résiduel du superphosphate a conduit à un supplément de rendement de 23,6 t ha^{-1} des pommes de terre en 1966 et de 4,16 t ha^{-1} de sucre en 1967. De 1969 à 1974, le champ d'essai a été soumis à une rotation de pommes de terre, orge, betterave sucrière et orge ; en 1968, le P des sols soluble dans $NaHCO_3$ variait de 3 à 67 mg P kg^{-1}. En 1969, les parcelles principales ont été divisées en micro-parcelles ; deux de ces dernières n'ont reçu aucune application de P, tandis que trois doses de superphosphate ont été appliquées aux pommes de terre ou à la betterave sucrière sur les autres. Entre 1969 et 1974, le rendement des pommes de terre a été d'environ 39 t ha^{-1} sur les parcelles contenant 25 mg P kg^{-1} (soluble dans $NaHCO_3$), et d'à peu près 43,5 t ha^{-1} sur les parcelles les plus enrichies. Les rendements moyens en sucre (6,54 à 6,70 t ha^{-1}) et de l'orge (4,87 à 5,12 t de grains ha^{-1}) ont peu varié sur les sols contenant plus de 25 mg de P soluble dans $NaHCO_3$ par kg de sol.

L'accumulation ou les pertes nettes de P et K dans les sols ont varié dans le même sens que la teneur des sols en P soluble et en K échangeable. Et pourtant, en culture d'épuisement, une grande partie du K non-échangeable et du P non-soluble dans le bicarbonate a été prélevée par les plantes.

ZUSAMMENFASSUNG

LANGFRISTIGE FRUCHTFOLGEVERSUCHE IN DEN VERSUCHSZENTREN VON ROTHAMSTED UND SAXMUNDHAM : WIRKUNGEN DER BEHANDLUNGEN AUF DIE KULTURERTRÄGE UND BODENANALYSEN UND NEUE VERÄNDERUNGEN AN ZIEL UND PLAN

In dieser Mitteilung werden die Ergebnisse und die neuen Veränderungen bezügliche dreier Fruchtfolgeversuche Südenglands beschrieben. Der früheste Versuch, die Agdellsehe Fruchtfolge, fing in dem Versuchszentrum von Rothamsted im Jahre 1848 an und ging fast unverändert

bis zu 1951 weiter. Er bestand in der Vergleichung zweier vierjährigen Fruchtfolgen *a)* Kohlrübe, Gerste, Klee (oder Pferdebohne) und Winterweizen *b)* Kohlrübe, Gerste, Brache und Winterweizen. Die Behandlungen waren folgende : ungedüngt, PKNaMg Düngung und NPKNaMg Düngung der Kohlrüben alle vier Jahre. Es gab nur sechs Parzellen und eine Ernte im Jahr. Zischen 1952 und 1957 wurde der Ort entweder brachliegend gelassen oder gleichförmig geerntet während sauere Böden Kalkdünger erhielten. Seit 1958 sind die Parzellen unterteilt worden, um in Mikroparzellenversuchen den Wert der P und K Rückstände im Boden zu bestimmen.

Zwei Fruchtfolgeversuche wurden im Jahre 1899 in dem Versuchszentrum von Saxmundham (Suffolk) angefangen. Der erste (Fruchtfolge I) bestand in einer vierjährigen Fruchtfolge : Weizen, Mangold, Gerste und Hülsenfrüchte (Pferdebohne, Erbse oder Klee). Die jährlich zugeführten Dünger umfassten Stallmist, Knochemmehl und alle möglichen Kombinationen von N, P und K Düngern. Es gab vier Wiederholungen von zehn Behandlungen und jede Kultur fand alle Jahre statt. Der Versuch, der bis zu 1965 unverändert weiterging, wurde zwischen 1966 und 1969 geändert, um den Vorteil höherer Stallmist- und N, P und K Gaben für die vier selben bestellbaren Kulturen zu bestimmen. Er wurde noch ab 1970 verändert, um den Gras- und Luzerneertrag und die Aufnahmesätze von N und K aus dem Boden zu vergleichen.

Der Fruchtfolgeversuch II in Saxmundham betraf dieselbe vierjährige Fruchtfolge als der Versuch I, aber die Behandlungen änderten sich gemäss der ausgeführten Kultur. Es wurde gezlelt zu bestimmen wie beschränkte Mengen von Stallmist und N und P Düngern durch die vier bestellbaren Kulturen best ausgenutzt sein könnten. Der Versuch ging bis 1952 unverändert weiter und einige Parzellen wurden bis 1964 mit der Anfangsdüngung geerntet. Zwischen 1964 und 1974 wurden diese Parzellen für Versuche benutzt, welche die Bedeutung der Phosphatdüngerrückstände für Gerste, Kartoffel und Zuckerrübe betrafen und welche kurz beschrieben sind.

РЕЗЮМЕ

Долгосрочные опыты с севооборотами на экспериментальных станциях в Ротхемштете и Саксмундхеме. Действие разных обработок на продуктивность культур и анализы почв. Недавние изменения целей и организации опытов.

Г. Е. Г. МЕТТИНГЛИ, А. Е. ДЖОНСТОН.

В данной работе описываются результаты полученные в трех опытах с севооборотами, проведенных на юге Англии, и недавно внесенные в них изменения. Самый старый из этих опытов (ротация Асделль) начат был в 1848-м году на экспериментальной станции в Ротхемштете, продолжался почти без изменений до 1951-го года и служил для сравнительного изучения двух четырехпольных севооборотов : а. брюква, ячмень, клевер (или фасоль) и озимая пшеница; б. брюква, ячмень, черный пар и озимая пшеница. Обработки в этом опыте были следующие : а. без удобрений (контроль); б. удобрение PK Na Mg; в. удобрение NPK Na Mg, внесенное полностью под брюкву. Каждый вариант насчитывал 6 повторностей (делянок) и одна из культур отсутствовала из севооборота каждый год. За исключением периода 1952-1957, почва одного из опытов периодически занималась черным, или занятым паром, и также периодически проводилось известкование кислых почв. Начиная с 1958-го года каждая делянка делилась на микро-делянки, для определения на этих последних процента остаточных фосфора и калия в почве.

Два других опыта с севооборотами начались в 1899-м году на экспериментальной станции в Саксмундхеме (Суффольк). Первый из них (ротация 1) представлял четырехпольный севооборот : пшеница, свекла, ячмень и бобовое (фасоль, горох, или клевер). Ежегодное внесение удобрений состояло из навоза, муки из костей и всевозможных комбинаций

питательных элементов NPK. Всего применялось 10 разных обработок в четырех повторностях, и каждая культура фигурировала в севообороте каждый год.

Этот опыт, продолжавшийся без перемен и перерывов до 1965-го года, был изменен между 1966-м и 1969-м годом для изучения действия более крупных доз навоза и минерального удобрения NPK на те-же 4 временные культуры. Позже, начиная с 1970-го года, были введены новые изменения, для сравнения продукции травы и люцерны, и определения процента почвенных N и K, вынесенных культурами из почвы.

REFERENCES

ARNOLD P. W., CLOSE B. M., 1961. Potassium-releasing power of soils from the Agdell rotation experiment assessed by glasshouse cropping. *J. agric. Sci., Camb.*, **57**, 381-386.

BOYD D. A., TRIST P. J. O., 1966. The Saxmundham rotation experiments : rotation II, 1899-1952. *J. agric. Sci., Camb.*, **66**, 337-339.

BREMNER J. M., 1960. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *J. agric. Sci., Camb.*, **55**, 11-33.

COLLINS S. H., 1906. Scheibler's apparatus for the determination of carbonic acid in carbonates : an improved construction and use for accurate analysis. *J. Soc. Chem. Ind., Lond.*, **25**, 518-522.

COOKE G. W., 1976. Long-term fertilizer experiments in England : the significance of their results for agricultural science and for practical farming. *Ann. agron.*, **27** (5-6).

COOKE G. W., MATTINGLY G. E. G., WILLIAMS R. J. B., 1958. Changes in the soil of a long-continued field experiment at Saxmundham, Suffolk. *J. Soil Sci.*, **9**, 298-305.

COOKE G. W., WILLIAMS R. J. B., 1972. Problems with cultivations and soil structure at Saxmundham. *Rothamsted Experimental Station. Report for* 1971, Part 2, 122-142.

FOGG D. N., WILKINSON N. T., 1958. The colorimetric determination of phosphorus. *Analyst, Lond.*, **83**, 406-414.

HANSON W. C., 1950. The photometric determination of phosphorus in fertilizers using the phosphovanadomolybdate complex. *J. Sci. Food Agric.*, **1**, 172-173.

JOHNSTON A. E., WARREN R. G., PENNY A., 1970. The value of residues from long-period manuring at Rothamsted and Woburn. IV. The value to arable crops of residues accumulated from superphosphate. *Rothamsted Experimental Station. Report for 1969*, Part 2, 39-68.

JOHNSTON A. E., PENNY A., 1972. The Agdell Experiment, 1848-1970. Estimates of the P and K accumulated from fertiliser given between 1848 and 1951, their recovery by grass between 1958 and 1970, and their effect on the response by grass to new dressings of P and K. *Rothamsted Experimental Station. Report for 1971*, Part 2, 38-68.

JOHNSTON A. E., MITCHELL J. D. D., 1974. The behaviour of K remaining in soils from the Agdell experiment at Rothamsted, the results of intensive cropping in pot experiments and their relation to soil analysis and the results of field experiments. *Rothamsted Experimental Station. Report for 1973*, Part 2, 74-97.

JOHNSTON A. E., MATTINGLY G. E. G., 1976. Experiments on the continuous growth of arable crops at Rothamsted and Woburn Experimental Stations : effects of treatments on crop yields and soil analyses and recent modifications in purpose and design. (This Conference).

JOHNSTON A. E., MATTINGLY G. E. G., POULTON P. R., 1976. Effect of phosphate residues on soil P values and crop yields. I. Experiments on barley, potatoes and sugar beet on sandy loam soils at Woburn. *Rothamsted Experimental Station. Report for 1975*, Part 2, 5-35.

LAWES J. B., GILBERT J. H., 1894. Rotation of crops. *Jl R. agric. Soc.*, series 3, vol. 5, 585-646.

MATTINGLY G. E. G., 1970. Total phosphorus contents of soils by perchloric acid digestion and sodium carbonate fusion. *J. agric. Sci., Camb.*, **74**, 79-82.

MATTINGLY G. E. G., JOHNSTON A. E., CHATER M., 1970. The residual value of farmyard manure and superphosphate in the Saxmundham rotation II experiment, 1899-1968. *Rothamsted Experimental Station. Report for 1969*, Part 2, 91-112.

MATTINGLY G. E. G., CHATER M., JOHNSTON A. E., 1975. Experiments made on Stackyard field, Woburn, 1876-1974. III. Effects of NPK fertilisers and farmyard manure on soil carbon, nitrogen and organic phosphorus. *Rothamsted Experimental Station. Report for 1974*, Part 2, 61-77.

METSON A. J., 1956. *Methods of chemical analysis for soil survey samples.* New Zealand Soil Bureau. Bulletin No. 12.

MURPHY J., RILEY J. P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, **27**, 31-36.

OLDERSHAW A. W., 1941. Experiments on arable crops at Saxmundham. *Jl. R. agric. Soc.*, **102**, 136-155.

OLSEN S. R., COLE C. V., WATANABE F. S., DEAN L. A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *Circ. U.S. Dep. Agric.* No. 939, 19 pages.

SALT P. D., 1967. Soil and plant analysis by flame emission spectrophotometry. *Spectrovision*, **18**, 9-12.

SALT P. D., 1968. The automatic determination of phosphorus in extracts of soils made with 0.5 *M* sodium hydrogen carbonate and 0.01 M calcium chloride. *Chemistry and Industry*, 584-586.

SCHOFIELD R. K., 1955. Can a precise meaning be given to « available » soil phosphorus ? *Soils Fertil.*, **18**, 373-375.

TINSLEY J., 1950. The determination of organic carbon in soils by dichromatic mixtures. *Trans. 4th int. Congr. Soil Sci.* (Amsterdam), **1**, 161-164.

TINSLEY J., TAYLOR T. G., MOORE J. H., 1951. The determination of carbon dioxide derived from carbonates in agricultural and biological materials. *Analyst, Lond.*, **76**, 300-310.

TRIST P. J. O., BOYD D. A., 1966. The Saxmundham rotation experiments : rotation I. *J. agric. Sci., Camb.*, **66**, 327-336.

TRUOG E., MEYER A. H., 1929. Improvements in the Deniges colorimetric method for phosphorus and arsenic. *Ind. Engng. Chem. analyt.* Edn., **1**, 136-139.

VARLEY J. A., 1966. Automatic methods for the determination of nitrogen, phosphorus and potassium in plant material. *Analyst, Lond.*, **91**, 119-126.

VOELCKER J. A., 1936. In : *Fifty years of Field Experiments at the Woburn Experimental Station.* Ed. Sir E. J. Russell and J. A. Voelcker, Chap. II. The residual manurial values of cake and corn fed to animals in yards or on the land. Stackyard field experiments. London : Longmans Green and Co., p. 7-25.

WALKLEY A., 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils — effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.*, **63**, 251-264.

WARREN R. G., 1958. The residual effects of the manurial and cropping treatments in the Agdell rotation experiment. *Rothamsted Experimental Station. Report for 1957*, 252-260.

WILLIAMS D. E., 1948. A rapid manometric method for the determination of carbonate in soils. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, **13**, 127-129.

WILLIAMS R. J. B., 1976. The chemical composition of water from land drainage at Saxmundham and Woburn (1970-75). *Rothamsted Experimental Station. Report for 1975*, Part 2, 37-62.

WILLIAMS R. J. B., COOKE G. W., 1971. Results of the rotation I experiment at Saxmundham, 1964-69. *Rothamsted Experimental Station. Report for 1970*, Part 2, 68-97.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 771-780.

THE EFFECT OF FERTILISERS ON THE YIELDS OF INDUSTRIAL POTATOES IN AN INTENSIVE CROPPING PLAN ON SANDY PEAT

A. BOSWIJK

Geert Veenhuizenhoeve,
Borgercompagnie (Holland)

SUMMARY

The object of the trial field « Zuid-Groningen 1 » is to study the effect of potash, phosphate, nitrogen and calcium on plant growth. For this purpose a very simple trial field in duplicate was laid out in 1918, on which in a close rotation of 1 : 2 industrial potatoes and cereals the effect has been studied of K_2O, P_2O_5, N and CaO, separately and combined, on the yields of the crops.

A few results with industrial potatoes are discussed.

INTRODUCTION

The trial field « Zuid-Groningen 1 » was laid out in 1918 and is located on the exprimental farm « Geert Veenhuizenhoeve » at Borgercompagnie in the VEENKOLONIËN, the reclaimed peaty area of the Province of Groningen.

This district used to be covered with ca. 70 000 ha moss peat, which was cut away between 1 600 and today. The top soil thus formed, is composed of a poor, oligotrophic moss peat and pleistocene sand, which is naturally acid and deficient in nutrients. For centuries, approximately until 1900, this sandy peat was enriched with town refuse compost form the city of Groningen. As a result the older parts of the area tend to be more fertile than those reclaimed in later times. Obviously, farmers in the VEENKOLONIËN have always been interested in the application of fertilisers in crop production.

This is the reason that the trial field « Zuid-Groningen 1 » was laid out, particularly because fertilisers were substituted for the town refuse compost. Its object was to study the effect of potash, nitrogen, phosphate and calcium on plant growth,

apart and in combination. The main crop in the VEENKOLONIËN, and adjacent sandy soils, is potatoes, which are cultivated especially for the production of potato starch.

The crop rotation is very intensive :

Potatoes and cereals/sugarbeet in a 1 : 2 cropping plan, *i.e.* a programm with 50 p. 100 potatoes, 30-35 p. 100 cereals and 15-20 p. 100 sugarbeet. Some of the results of the experiment with potatoes as a main crop will be discussed.

THE TRIAL FIELD

The design of the trial field is very simple and is laid out in duplicate as follows (table 1) :

TABLE 1

Treatments applied to the trial field « Zuid-Groningen 1 »

b	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8
a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

1 = untreated	(0)	9 = phosphate + nitrogen	(P N)
2 = potash	(K)	10 = phosphate + calcium	(P Ca)
3 = phosphate	(P)	11 = nitrogen + calcium	(N Ca)
4 = nitrogen	(N)	12 = potash + phosphate + nitrogen	(K P N)
5 = calcium	(Ca)	13 = potash + phosphate + calcium.	(K P Ca)
6 = potash + phosphate	(K P)	14 = potash + nitrogen + calcium	(K N Ca)
7 = potash + nitrogen	(K N)	15 = phosphate + nitrogen + calcium	(P N Ca)
8 = potash + calcium	(K Ca)	16 = potash + phosphate + nitrogen + calcium	(K P N Ca)

The size of the plots is $8 \times 12\frac{1}{2} = 100$ m².

The basic applications are :

potash : 200 kg K_2O per ha, after 1934 160 kg per ha
phosphate : 100 kg P_2O_5 per ha
nitrogen : 120 kg pure N per ha for potatoes
(60 kg pure N per ha for cereals)
calcium : 100 kg CaO per ha until 1925 ; after this it was tried to apply so much calcuim that the plots with calcium maintain a pH-H_2O of 5.5.

Phosphate has practically always been applied as superphosphate, both to potatoes and to cereals.

The patatoes have received applications of potash magnesia sulphate ; the cereals have been treated with K 40.

Until 1940 the nitrogen was applied as sodium nitrate, afterwards as calcium ammonium nitrate. Lime marl (ground limestone) is employed as a liming material.

RESULTS

Of the results of this trial field three aspects will be discussed :

1) The effect of potash application on the starch production of potatoes, notably,

a) on the starch content ;

b) on the tuber yield and the starch yield.

2) The effect of a deficiency of nutrients (since 1918) on the tuber yield of potatoes.

3) The trend of soil fertility.

1. — *The effect of potash on the starch production of potatoes*

Even from the first year the trial clearly showed the effect of potash on the starch production. This was primarily the influence of an excess of potash on the starch content of potatoes.

a) Effect of potash on the starch content (table 2).

TABLE 2

Effect of potash on the starch content of potatoes (p. 100)

Plot	1918	1920	1922	1924	1926	1928	1930	1932	1934	1936	1938
PN	17.4	16.7	18.6	17.4	15.5	16.2	16.5	15.7	17.6	14.9	15.2
KPN	*16.6*	*14.9*	*16.4*	*15.7*	16.9	16.8	*15.7*	*14.7*	18.1	16.9	17.1
PCa	18.2	17.7	20.1	18.2	17.2	17.2	16.5	15.8	17.4	15.5	16.1
KPCa	*17.5*	*16.5*	*17.7*	*16.4*	17.7	*15.7*	16.7	*15.3*	18.7	17.4	19.3
NCa	16.7	15.6	17.8	17.5	16.5	17.0	16.8	16.3	17.7	15.3	16.2
KNCa	*16.4*	*14.5*	*16.3*	*14.5*	*16.1*	*14.4*	*15.3*	*13.8*	17.7	15.9	16.6
PNCa	16.8	16.7	18.2	17.6	15.6	16.0	16.2	16.1	17.4	15.9	14.9
KPNCa ...	17.0	*15.0*	*16.8*	*16.0*	17.1	16.1	*15.6*	*14.9*	18.6	17.3	17.7

The figures show clearly that potash applications for the first few years (eight harvests) have an unfavourable effect on the starch content of potatoes. Until 1934 the starch content on plots treated with potash was in the majority of cases lower than on the plots not treated with potash.

There is evidently an adverse effect of potash excess on the starch content. In Holland this is often referred to as the « Kok effect » after the agronomist JAN KOK, who discovered it.

b) Also for a maximum tuber yield and starch yield the potash supply in the soil was too high in the first few years. This is shown in the table 3.

TABLE 3

Effect of potash on the tuber yield and starch yield of industrial potatoes (relative) (without K = 100)

		K P N	K P Ca	K N Ca	K P N Ca
1918	Tuber yield	98	97	98	97
	Starch yield	94	94	96	90
1920	Tuber yield	98	105	99	107
	Starch yield	87	97	92	96
1922	Tuber yield	118	114	115	127
	Starch yield	103	102	105	118
1924	Tuber yield	201	142	173	212
	Starch yield	180	128	143	194
1926	Tuber yield	216	188	167	185
	Starch yield	236	195	161	203

During the first cropping years the application of potash has a negative effect on the tuber yield.

Because, as has been found, the starch content on treated plots is lower, it is obvious that the total starch yield is lower here. However, the potash supply in the soil is found to be reduced to such a degree, after two harvests, that, in spite of

TABLE 4

Tuber yield in p. 100 of the plot with complete treatment

Plots		1918	1924	1930	1936	1942	1947	1958	1967	1974
1	O	67	42	34	27	22	22	22	27	23
2	K	66	58	53	50	37	33	38	40	39
3	P	67	37	29	25	24	15	16	25	19
4	N	99	43	36	25	44	20	27	28	22
5	Ca	64	38	31	29	28	22	21	26	30
6	K P	66	60	63	64	44	49	37	40	32
7	K N	98	79	78	72	74	87	76	77	91
8	K Ca	59	55	54	52	45	42	42	54	52
9	P N	108	48	36	23	30	14	25	26	25
10	P Ca	68	44	23	22	21	16	15	24	24
11	N Ca	101	48	37	24	36	20	28	26	34
12	K P N	106	96	96	96	101	92	97	94	97
13	K P Ca	66	62	66	61	56	49	40	42	47
14	K N Ca	99	83	79	80	83	84	81	81	101
15	P N Ca	98	47	43	29	31	19	26	31	36
16	K P N Ca	100	100	100	100	100	100	100	100	100

a higher starch content, both the tuber yield and the starch yield fall short of the yields on the treated plots. The conclusion is that industrial potatoes need estimated optimum potash applications and that an excess of potash decreases the starch yield.

2. — *The effect of a deficiency of nutrients* (since 1918) *on the tuber yield of potatoes*

The table 4 shows the relative tuber yields, expressed in percentages of the plot with complete treatment, of every third cropping year.

The figures show that in the course of years great differences in yields were found between the plots receiving different applications.

A comparison of the average of all the plots which are or are not treated *with phosphate* shows the following picture (table 5) :

TABLE 5

Tuber yields of plots treated or not treated with P_2O_5 *in p. 100 of the plot with complete treatment*

Plots	1918	1924	1930	1936	1942	1947	1958	1967	1974
+ P	85	62	57	53	51	44	45	48	48
— P	82	56	50	45	46	41	42	45	49

After nearly 60 years there is found to be no difference in tuber yields on plots with and without P_2O_5.

This means that abundance of phosphate in the soil ensures that no deficiency is found after a great number of years.

It also means that a high phosphate status of the soil has no adverse effect on the yield of a potato crop.

Also the influence of CaO on the yield is only small. The following figures (table 6) show this :

TABLE 6

Tuber yields of plots treated or not treated with CaO *in p. 100 of the plot with complete treatment*

Plots	1918	1924	1930	1936	1942	1947	1958	1967	1974
+ CaO	82	60	54	50	50	44	44	48	53
— CaO	85	58	53	48	47	42	42	45	44

From this, it may be concluded that potatoes on the more acid soils are just as productive as on soils with a lower acidity. It is for this reason that potatoes have become a favoured crop on reclaimed peat soils. This is also shown by the following figures (table 7) :

TABLE 7

pH and tuber yield in p. 100 of the plot with complete treatment
(KPNCa = 100)

	1934	1936	1941	1947	1951		1954	1964	1972
pH-H_2O	5.3	5.25	5.95	5.4	5.2	pH-KCl	4.2	3.9	3.7
KPN	101	96	101	92	103		98	97	100

The effect of *nitrogen* is shown in table 8.

The figures show that the omission of nitrogen treatment greatly affects the yield of potatoes.

TABLE 8

Tuber yields of plots treated or not treated with N in p. 100 of the plot with complete treatment

Plots	1918	1924	1930	1936	1942	1947	1958	1967	1974
+ N	101	68	63	56	62	55	58	58	63
— N	65	50	44	41	35	31	29	35	33

Yet, the influence of « no potash » treatment is even greater, as will be shown. Through the decomposition of the peat, nitrogen becomes available every year, but no potash.

Of the four nutrients K, P, N and Ca, *potash* has the greatest effect on the yield of the potato crop (table 9).

TABLE 9

Tuber yields of plots treated or not treated with K 20 in p. 100 of the plot with complete treatment

Plots	1918	1924	1930	1936	1942	1947	1958	1967	1974
+ K	83	74	74	72	68	67	64	66	70
— K	84	43	34	26	30	19	23	27	27

No potash results in a considerable drop in the tuber yield of potatoes.

The conclusion is that on reclaimed peat soil, potash has the greatest effect on the tuber yield of potatoes, immediately followed by nitrogen.

The pH and phosphate have no or hardly any effect on the tuber yield, which also is illustrated in table 10.

TABLE 10

Tuber yields when one nutrient is lacking in p. 100 of the plot with complete treatment (averages of the three last cropping years)

(KPNCa = 100)

	1970-1972-1974	1918
KPN	98	106
KPCa	50	66
KNCa	100	99
PNCa	40	98

3. — *The trend of soil fertility*

a) The following figures (table 11) show the trend of the amount of potash in the soil, in the years of which these figures are available.

TABLE 11

K-number of soil in 1936, 1941, 1946, 1951 and 1972

Plot-number	1936	1941	1946	1951	1972
1	11	7	7	4	4
2 (+ K)	*24*	*23*	*20*	*11*	*12*
3	11	7	7	4	4
4	10	6	6	3	3
5	10	6	6	3	3
6 (+ K)	*21*	*20*	*24*	*11*	*13*
7 (+ K)	*21*	*20*	*19*	*11*	*9*
8 (+ K)	*25*	*24*	*24*	*13*	*12*
9	9	12	6	3	3
10	10	6	7	3	3
11	9	6	8	3	3
12 (+ K)	*18*	*19*	*26*	*14*	*6*
13 (+ K)	*20*	*23*	*43*	*11*	*11*
14 (+ K)	*22*	*22*	*28*	*9*	*8*
15	10	6	7	3	3
16 (+ K)	*18*	*19*	*21*	*5*	*6*

The amount of potash on non-treated plots is already in 1936 considerably smaller than on treated plots. But also on the latter the K-Number shows a considerable decline after 1950.

From this it may be concluded that with the fertilisers applied the potash status of the soil cannot be maintained.

Owing to the abundant harvests in the last few years and too less dressings the K reserve is entirely withdraw from the soil, which is evident from plot 16 with complete treatment.

b) *P-citric acid number.*

The trend of the phosphate status of the soil shows the following picture (table 12).

TABLE 12

The P-citric acid number of the soil in 1936, 1941, 1946, 1951 and 1972

Plot-number	1936	1941	1946	1951	1972 (*)
1	29	30	28	26	65
2	26	30	32	27	69
3 (+ P)	*74*	*85*	*87*	*75*	*205*
4	25	27	29	27	71
5	30	31	32	30	56
6 (+ P)	*71*	*75*	*77*	*70*	*160*
7	19	20	21	17	45
8	24	25	26	23	42
9 (+ P)	*75*	*85*	*80*	*79*	*180*
10 (+ P)	*76*	*96*	*93*	*79*	*153*
11	26	34	34	30	75
12 (+ P)	*61*	*78*	*71*	*70*	*160*
13 (+ P)	*76*	*88*	*87*	*75*	*156*
14	22	23	27	24	40
15 (+ P)	*70*	*77*	*78*	*69*	*115*
16 (+ P)	56	68	67	67	135

(*) 1972 = p-water.

The abundance of phosphate of the phosphate-treated plots is clearly evident. But on the plots not applied with phosphate, the phosphate status does not decline or hardly declines after nearly 60 years.

This proves the abundance of phosphate in the older reclaimed peat soils, which is to be attributed to the dressing with town refuse composts for centuries.

c) *The pH.*

The following survey (table 13) shows the pH of the soil over a number of years. It proves to be difficult to attain the desirable pH-KCl of 4.8. In 1973 it was tried again to reach the required pH on plots no.'s 5, 8, 10, 11, 13, 14, 15 and 16 by liming. The result is not yet known.

The lime-treated plots have a clearly higher pH than the « no lime » plots. This is not or hardly evident from the tuber yield.

TABLE 13

The trend of the pH

Plot-number	pH-H_2O					pH-KCl			
	1934	1936	1941	1947	1951	1951	1954	1964	1972
1	4.45	5.1	4.8	5.2	5.0	3.9	3.8	3.8	3.6
2	4.65	4.85	4.75	5.15	5.0	3.9	3.8	3.7	3.5
3	4.7	4.8	4.6	5.15	4.8	3.9	3.8	3.6	3.5
4	4.95	5.1	4.95	5.15	4.8	3.8	3.7	3.7	3.6
5 (+ Ca)	4.8	5.35	5.05	5.15	5.2	4.2	4.2	3.8	4.0
6	4.65	4.65	4.65	5.1	5.0	4.0	3.8	3.8	3.6
7	5.25	5.1	5.15	5.3	5.1	4.1	3.9	3.7	3.6
8 (+ Ca)	4.85	5.25	5.2	5.5	5.4	4.3	4.3	4.0	4.0
9	5.2	5.15	5.05	5.35	5.0	4.1	4.0	3.9	3.8
10 (+ Ca)	4.85	5.6	5.1	5.4	5.2	4.5	4.4	4.0	4.2
11 (+ Ca)	5.15	5.45	5.3	5.45	5.3	4.4	4.3	4.0	4.1
12	5.3	5.25	5.25	5.4	5.2	4.2	4.2	3.9	3.7
13 (+ Ca)	5.0	5.35	5.15	5.45	5.3	4.3	4.3	3.9	4.0
14 (+ Ca)	5.55	5.45	5.4	5.6	5.4	4.4	4.4	4.0	4.1
15 (+ Ca)	5.45	5.65	5.3	5.65	5.3	4.5	4.4	4.1	4.2
16 (+ Ca)	5.45	5.45	5.3	5.65	5.5	4.5	4.5	4.1	4.2

CONCLUSIONS

a) An excess of potash has an unfavourable effect on the starch content of potatoes (« KOK EFFECT »).

b) The potash supply in the soil can be too high for a maximum tuber yield and a maximum starch yield.

c) The tuber yield and the starch yield are considerably dependent on an estimated optimum K application.

d) A phosphate application on (older) reclaimed peat soils has no or hardly any effect on the tuber yield.

e) The tuber yield is only slightly dependent on the pH.

f) The tuber yield is considerably dependent on the nitrogen application.

g) With the potash applied it proves to be impossible to maintain the K supply in the soil.

h) The (older) reclaimed peat soils are rich in phosphate.

i) It is difficult to attain (maintain) the desirable pH with the lime dressings applied.

Reçu pour publication en septembre 1976.

RÉSUMÉ

EFFET DES ENGRAIS SUR LES RENDEMENTS DE LA POMME DE TERRE INDUSTRIELLE EN CULTURE INTENSIVE SUR TOURBE SABLONNEUSE

Le champ d'essai « Zuid-Gröningen-l » a pour objet l'étude de l'effet du potassium, du phosphore, de l'azote et du calcium sur la croissance des plantes. Dans ce but, un essai au champ très simple comportant une répétition a été mis en place en 1918. Sur ce dernier furent étudiés les effets de K_2O, P_2O_5, N et CaO utilisés séparément ou en combinaison, sur le rendement des cultures d'une rotation intensive, 50 p. 100 pommes de terre industrielles, blé. Quelques résultats obtenus sur pommes de terre industrielles sont discutés.

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS DER DÜNGEN AUF DIE ERTRÄGE VON AUF SANDTORF INTENSIV BEBAUTEN INDUSTRIEKARTOFFELN

Der « Zuid-Gröningen-l » Versuchsfeld soll die Untersuchung der Wirkung von Kalium, Phosphor, Stickstoff und Kalzium auf das Pflanzenwachstum ermöglichen. In dieser Absicht wurde ein sehr einfacher, eine Wiederholung umfassender Feldversuch im Jahre 1918 aufgestellt. Es wurden die Wirkungen von einzeln oder kombiniert verabreichten K_2O, P_2O_5, N und Ca O auf den Kulturertrag einer intensiven, aus 50 p. 100 Industrie kartoffeln-Weizen bestehenden Fruchtfolge untersucht. Einige der auf Industrie kartoffel erzielten Ergebnisse wurden erläutert.

РЕЗЮМЕ

Действие удобрений на урожайность промышленного картофеля при интенсивной культуре на песчанном торфе.

А. БОСВИЙК.

На опытном поле « Зюид Гронинген-1 » изучалось влияние калия, фосфора, азота и кальция на рост растений. Для этой цели в 1918-м году начат был очень простой полевой опыт, включавший одну повторность, и в опыте этом изучено было влияние K_2O, P_2O_5, N, и CaO вносившихся по отдельности, или в разных комбинациях, на урожайность различных культур интенсивной ротации с 50 % промышленного картофеля и пшеницы. В данном труде обсуждаются результаты плученные с промышленным картофелем.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 781-789.

ÉTUDE COMPARÉE DES EFFETS DU FUMIER DE FERME ET DES ENGRAIS MINÉRAUX SUR SOL SABLONNEUX « DÉTOURBÉ » (SAPPEMEER, 1881-1934)

L. C. N. DE LA LANDE CREMER

Instituut voor Bodemvruchtbaarheid (Institut pour l'Étude de la Fertilité du Sol), Oosterweg 92, Haren, Gr. (Pays-Bas)

RÉSUMÉ

Sur un sol « détourbé » au début du XVIIe siècle et ayant reçu auparavant de fortes fumures sous forme de compost de gadoues et de fumier, un essai de fertilisation fut établi en 1881 et poursuivi jusqu'en 1934 avec comme traitements : du fumier, une fumure minérale complète et différentes combinaisons des éléments principaux. Le but de cette expérience, établie par un agriculteur, était de voir s'il serait possible de remplacer le fumier de ferme par des engrais minéraux sans que le sol s'épuise à la longue.

Il s'avéra possible sur ce sol « détourbé » contenant 27 p. 100 d'humus, d'obtenir avec des engrais minéraux des rendements supérieurs à ceux produits antérieurement par l'utilisation de 50 à 60 tonnes de fumier à l'ha sans fumure minérale, dans un assolement de pommes de terre et de céréales. L'utilisation combinée du fumier (50 p. 100) et de la fumure minérale (50 p. 100) ne donna pas non plus d'avantages par rapport à celle de la fumure minérale seule.

L'utilisation prolongée de sulfate d'ammoniaque sans chaulages périodiques occasionna de fortes diminutions de rendements sur céréales (seigle et avoine) et, de temps à autre, aussi sur pommes de terre.

L'effet de l'azote du fumier, l'année de son application, fut inférieur à celui connu dans d'autres expériences. Il y eut cependant un arrière-effet distinct sur les céréales.

Le taux d'humus du sol ne sembla pas être influencé par les fortes doses de fumier utilisées, mais la forte variation du taux d'humus provenant des irrégularités du terrain et le niveau d'humus ont dû masquer cette influence.

I. — INTRODUCTION

Au sud-est de la ville de Groningen, il y eut dans le passé de vastes complexes de tourbières. Celles-ci furent « détourbées » au cours de plusieurs siècles. Le sous-sol sablonneux fut mélangé avec la couche superficielle de la tourbière réservée à cet effet et, par la suite, utilisé comme terre de culture. La productivité de ces sols humifères est très élevée à condition qu'ils soient bien fertilisés. Dans le passé les fumures

consistèrent en l'emploi de fortes doses de fumier (50 à 60 tonnes à l'ha) ou de compost de gadoues que les bateaux transportant la tourbe ramenaient de la ville de Groningen. Ces fumures étaient appliquées aux pommes de terre qui occupaient 50 p. 100 de l'assolement. Les céréales qui suivaient, seigle ou avoine, devaient se contenter de l'arrière-effet. Pommes de terre et céréales alternaient.

Dans les années 70 du siècle dernier, les prix des produits agricoles ont dû être très favorables. Mais les prix pour le fumier et le compost atteignirent également un niveau insoupçonné. Les agriculteurs sur sols « détourbés » qui, sans ces engrais et surtout sans de fortes doses de ceux-ci, n'arrivent pas à produire suffisamment, cherchèrent des moyens de limiter le besoin élevé en fumier et compost. On essaya le guano et la suie de cheminée comme fumure complémentaire du fumier avec des résultats d'ailleurs fort variables. C'est ce problème qui poussa l'agriculteur A. G. MULDER à Sappemeer à chercher son salut auprès des engrais minéraux. Il voulut savoir si le fumier pouvait être remplacé par une fumure minérale complète sans porter préjudice au sol. En outre, il voulut savoir s'il était possible d'économiser sur un des éléments principaux, azote, phosphore ou potasse. A cet effet il établit un essai sur un sol mis en culture au début du XVIIe siècle. Depuis un passé lointain, avant le début de l'expérience, ce sol était amendé avec des fortes doses de compost ou de fumier. La couche arable mesurait 15 à 18 cm de profondeur et contenait 27 p. 100 d'humus. Cet essai fut d'abord complètement suivi par MULDER (1895-1896 ; MULDER et SJOLLEMA, 1898 ; MULDER *et al.*, 1918, 1929). En 1914 son successeur obtint l'assistance technique de l'ancienne Station agronomique de l'État à Groningen, prédécesseur de l'Institut pour la Recherche de la Fertilité du Sol à Haren. En 1931 l'essai tomba complètement sous la gestion de la Station Agronomique qui poursuivit l'expérience encore jusqu'en 1935. Les rapports furent également établis par les chercheurs de la Station. La communication suivante est un résumé des conclusions principales des publications sur cette expérience.

II. — PLAN D'ESSAI

L'essai comprenait deux bandes de 12 parcelles orientées nord-sud et comprenant à l'origine les traitements suivants :

1. fumier sur pommes de terre, céréales sans fumure ;
2. N (nitrate de soude), P, K ;
3. N (nitrate de soude), P, — ;
4. N (nitrate de soude), —, — ;
5. — , P, K ;
6. — , —, — ;
7. N (nitrate de soude), —, — ;
8. — , P, — ;
9. — , —, K ;
10. N (sulfate d'ammoniaque), P, K ;
11. 1/2 fumier + 1/2 NPK aux pommes de terre et 1/2 NPK aux céréales (N sous forme de nitrate de soude) ;
12. tous les 4 ans, du fumier aux pommes de terre et dans les années intermédiaires, N sous forme de nitrate de soude.

Le traitement n° 10 fut subdivisé en 1912 en une moitié continuant la fumure originelle avec du sulfate d'ammoniaque et une moitié chaulée en 1912, 1915, 1919, 1926 et 1930.

Le plan de fumure d'origine de l'expérience ne fut exécuté de façon suivie que depuis 1885 sur la bande occidentale. Sur la bande orientale par contre, on s'écarta aussi après cette année à plusieurs reprises du plan initial. Le rapport traitera seulement par conséquent des résultats obtenus sur la bande occidentale depuis l'année 1885.

III. — FUMURES

Les pommes de terre reçurent au début une fumure de 30 tonnes de fumier en 1882, puis de 60 tonnes jusqu'à 1896 et ensuite de 50 tonnes jusqu'à la fin de l'expérience.

Les traitements aux engrais minéraux consistèrent jusqu'en 1900 en 40 à 45 kg d'azote par ha, 60 kg jusqu'en 1910, 75 kg jusqu'en 1922 et 90 kg jusqu'à la fin de l'expérience.

La fumure potassique sous forme de sulfate de potasse fut de 135 kg K_2O à l'ha jusqu'en 1898, 156 kg jusqu'en 1914, 160 kg jusqu'en 1920, 190 kg jusqu'en 1924 et 200 kg jusqu'en 1935.

Les quantités d'engrais phosphatés varièrent de 68 à 75 kg de P_2O_5 par ha sous forme de superphosphate (1880-1892 ; 1904-1920) ou de scories de déphosphoration les autres années.

La fumure azotée pour le seigle d'hiver varia de 34 kg de N/ha au début de l'essai vers 70 kg à la fin et pour l'avoine de 34 kg à 60 kg. L'apport d'acide phosphorique aux céréales passa de 34 kg P_2O_5 par ha à 75 kg et celui de la potasse de 51 kg K_2O par ha à 150 kg.

Avec le fumier, il y eut, d'après les normes actuelles (KOLENBRANDER et DE LA LANDE CREMER, 1967), un apport de 300 kg d'azote total, 190 kg de P_2O_5 et 190 kg de K_2O.

L'efficacité de l'azote est, d'après la même référence, 40 p. 100 de celle de l'azote minéral, lorsque le fumier est utilisé au printemps, ce qui fut le cas dans cet essai.

IV. — L'ASSOLEMENT

L'assolement suivi fut pommes de terre, seigle, pommes de terre, avoine.

V. — RÉSULTATS

Rendements

Pour une présentation claire, seuls les rendements des traitements 6 (témoin sans fumure), 1 (fumier) et 2 (NPK, nitrate de soude) ont été résumés. Le tableau 1

TABLEAU 1

Rendements en tubercules de pommes de terre (kg/are) *et fumure minérale moyenne* (kg/ha)

Période	Rendements (kg/are)			Fumure minérale (kg/ha)		
	fumier	NPK	témoin	N	P_2O_5	K_2O
1882-1892 ..	265	282	117	41	68	135
1894-1902 ..	311	315	106	47	70	148
1902-1912 ..	294	301	89	60	65	156
1914-1922 ..	224	249	58	73	71	164
1924-1934 ..	336	358	72	89	78	198

mentionne les rendements en tubercules de vingt-six années d'essai, récapitulés en cinq périodes successives.

Les rendements des céréales sont récapitulés sur deux périodes totalisant treize années d'avoine et treize années de seigle (tabl. 2).

TABLEAU 2

Rendements des céréales (kg/are)

Période	Céréale	Grains (kg/are)			Paille (kg/are)		
		fumier	NPK	témoin	fumier	NPK	témoin
1881-1901 ..	avoine	36	37	27	47	50	33
1915-1931 ..	avoine	28	33	17	46	62	26
1889-1907 ..	seigle	32	34	10	52	57	20
1909-1929 ..	seigle	28	34	10	42	56	19

Analyses chimiques du sol

Il ne fut pas prêté beaucoup d'attention aux analyses chimiques du sol dans cette expérience. Comme première donnée, MULDER *et al.* (1918) mentionnent un taux d'humus du sol de 25 p. 100 (déterminé par perte au feu) et une teneur en azote de 0,6 à 0,7 p. 100. On ne sait pas en quelle année cette détermination fut effectuée, l'annotation manquant dans la documentation sur l'essai. MEIJER (1934) mentionne 27 p. 100 d'humus (perte au feu).

C'est seulement en 1924 que commencèrent des analyses annuelles du taux

TABLEAU 3

Analyse chimique du sol

Période	Détermination	Fumier	NPK	Témoin
Avant 1930 (n=5)..	pH-H_2O	4,72	5,16	4,44
Après 1930 (n=5) ..	pH-H_2O	4,97	5,22	4,84
1925-1934	K-get. (1)	15	16	9
1930-1932	P-get. (2)	11	17	3
1933	P-citr. (3)	44	57	14

(1) K-get. = 0,09 kg K_2O/1000 kg d'humus.

(2) P-get. = mg P_2O_5/100 g de sol sec, déterminée dans de l'eau distillée à 50°C.

(3) P-citr. = mg P_2O_5/100 g de sol sec, déterminée dans une solution d'acide citrique à 1 p. 100.

d'humus, de la densité (en vue de l'état calcique du sol, alors très à la mode), du pH et de l'état calcique. En 1925, on y ajouta les déterminations de potasse et en 1931 celles de phosphate (P-get. depuis 1931 et P-citr. depuis 1933).

Les taux d'humus moyens de la période 1924-1933 furent de 25,2 p. 100 pour le traitement au fumier, 25,6 p. 100 pour celui au NPK (nitrate de soude) et 29,5 p. 100 pour le témoin sans fumure. Le taux moyen pour l'ensemble de l'essai fut 27,9 p. 100. Signalons que les taux d'humus croissent jusqu'au milieu de l'essai où se situe le témoin et diminuent ensuite! Le tableau 3 récapitule quelques résultats d'analyses chimiques du sol.

Le traitement au fumier fut chaulé en 1930 avec 2 800 kg de marne par hectare, les autres traitements le furent avec d'autres quantités dans l'intention de supprimer les différences de pH, ce qui ne réussit pas tout à fait.

VI. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

En discutant les résultats, on fournira également d'autres informations publiées au sujet de cette expérience mais dont les données de base par souci de concision, n'ont pas été mentionnées dans la présentation.

Comme il fallait s'y attendre, le témoin sans fumure s'épuisa de plus en plus (tabl. 1 et 3).

Malgré l'augmentation des doses de fumure minérale au cours des années et l'emploi de meilleures variétés dans les cultures, il n'y eut qu'à peine une augmentation parallèle des rendements. Soulignons cependant que les doses d'azote utilisées vers la fin de l'expérience furent, d'après nos connaissances actuelles, encore loin d'être suffisantes pour la culture de pommes de terre sur ce type de sol. Cette remarque est également valable pour le traitement au fumier qui reçut 300 kg d'azote. D'après les normes moyennes (Kolenbrander et De La Lande Cremer, 1967), 100 kg de cet azote égalent en efficacité 40 kg d'azote minéral lorsque le fumier est appliqué au printemps et 20 kg s'il est appliqué en automne. En considérant les rendements de la période 1924-1934 (tabl. 1), le coefficient d'efficacité de l'azote du fumier a cependant dû être ici inférieur à 35 p. 100. Les rendements obtenus avec 300 kg d'azote de fumier étant en effet de 6 p. 100 inférieurs à ceux obtenus avec 89 kg d'azote minéral sous forme de nitrate de soude ; le coefficient d'efficacité a dû être $(100 \times 89) : 250 = < 35$ p. 100.

Peut-être cette action inférieure à la moyenne découle-t-elle de l'emploi d'un fumier bien fait dont il est connu que l'efficacité est plus basse ou bien y eut-il d'autres facteurs en jeu.

Le niveau des rendements obtenus avec le fumier (60 tonnes à l'hectare au début, plus tard 50 tonnes) suit un cours pratiquement parallèle à celui du traitement NPK avec nitrate de soude, mais quelque peu inférieur à celui-ci.

Les rendements des traitements 11 et 12 dont les données ne figurent pas dans cette communication et qui tous les deux reçurent la moitié de la dose de fumier du traitement 1 et de la fumure minérale du traitement 2, eurent, en moyenne, pendant la période 1882-1934, des rendements se situant entre ceux obtenus avec le fumier et ceux obtenus avec la fumure minérale complète.

Les céréales du traitement avec fumier durent se contenter de son arrière-effet. Sur le traitement NPK, elles reçurent une fumure moyenne de 34 kg de N, 51 kg de P_2O_5 et 34 kg de K_2O à l'hectare, au début de l'essai, s'élevant à 60 kg de N, 75 kg de P_2O_5 et 150 kg de K_2O à la fin pour l'avoine et 70 kg de N, 75 kg de P_2O_5 et 150 kg de K_2O pour le seigle. Il y eut une arrière-action prononcée du fumier sur les rendements (tabl. 2). Par rapport à la première période cette arrière-action ne fut inférieure que sur le seigle du traitement au fumier, aussi bien pour le rendement en grains que pour le rendement en paille. Dans la première période, l'accroissement de rendement en grains + paille par rapport au rendement du témoin s'éleva pour l'avoine du traitement avec fumier, à 85 p. 100 de celui du traitement NPK et dans la seconde période à 60 p. 100 de celui-ci. Pour le seigle, ces chiffres furent respectivement 89 p. 100 et 67 p. 100. Pour les deux parties de la période d'essai l'augmentation de rendement par le fumier par rapport au témoin et en pourcentage de l'augmentation du traitement NPK fut :

	Pommes de terre (%)	Céréales (%)
1re partie de la période d'essai	95	87
2e partie de la période d'essai	91	64

Il semble que le fumier n'ait pas amélioré la fertilité du sol. Cependant le rapport entre les productions des traitements fumier et NPK a diminué au cours du temps. On peut donc estimer que le coefficient d'efficacité de l'azote du fumier a évolué de 13 % à environ 33 % du début à la fin de l'essai.

En dépit du fait que même à la fin de l'expérience, la fumure minérale ne fut pas encore optimale pour ce type de sol (tabl. 1), l'apport de 50 à 60 tonnes de fumier à l'hectare ne réussit pas à égaler le niveau de rendement du traitement NPK. Les différences auraient certainement été plus marquées si la fumure minérale avait été correcte.

Les méthodes d'agriculture « biologiques » auront une tâche bien difficile pour obtenir suffisamment de fumier pour la production maximale, voire pour produire par elles-mêmes le fumier nécessaire à cet effet ; 60 tonnes pour deux années équivalant à la production de fumier de 6 unités de gros bétail par hectare et par an en 180 jours de stabulation!

Au sujet des autres résultats non mentionnés au début de cette communication, il faudra encore relever qu'une fumure continue avec du sulfate d'ammoniaque sans chaulages périodiques occasionna une forte diminution des rendements céréaliers, tandis que de temps à autre les pommes de terre furent également défavorablement influencées. D'autre part l'avoine sembla sur ce type de sol pouvoir mieux utiliser la potasse du sol que le seigle et les pommes de terre.

Les taux d'humus ne semblent pas indiquer une influence de l'utilisation pendant un demi-siècle de fortes quantités de fumier ni d'une omission de toute fumure (§ VI).

Cependant l'apport annuel en matière organique par 50 tonnes de fumier s'éleva à (50 × 140) : 2 = 3 500 kg, soit 0,29 p. 100 à 0,24 p. 100 du poids de la couche arable de 15 à 18 cm d'épaisseur et d'une densité de 0,82. Or d'après KOLENBRANDER (1974),

un apport annuel en matière organique sous forme de fumier de l'ordre de 1 p. 100 du poids de la couche arable élèverait le taux d'humus de 3 p. 100 en valeur absolue en dix années. Dans les conditions de cette expérience, on pourrait donc s'attendre à une élévation de (0,24 à 0,29) × 3 = 0,72 à 0,87 p. 100. Cette élévation n'a pu cependant être retrouvée dans ce sol, dont le taux d'humus moyen est de 27,9 p. 100 variant de 23,4 p. 100 à 31,3 p. 100 selon les traitements en raison de l'hétérogénéité du terrain.

VII. — CONCLUSIONS

La fumure aux engrais minéraux d'un ancien sol « détourbé » à 28 p. 100 d'humus pendant une période d'un demi-siècle (1881-1934), n'a pas porté préjudice à sa productivité comme on le craignait auparavant. On obtint au contraire des rendements meilleurs que ceux de l'époque antérieure où les pommes de terre recevaient 50 à 60 tonnes de fumier à l'hectare tandis que les céréales devaient se contenter de l'arrière-effet de cette fumure, dans un assolement pommes de terre-céréales. La combinaison fumier et engrais minéral (1/2 + 1/2) ne donna pas non plus d'avantages sur l'emploi des engrais minéraux seuls.

L'utilisation continue du sulfate d'ammoniaque sans chaulages périodiques occasionna une forte diminution des rendements des céréales et fut de temps à autre également défavorable pour les pommes de terre.

L'effet du fumier comme engrais azoté fut inférieur à celui obtenu dans d'autres expérimentations. Il y eut cependant un arrière-effet prononcé sur les céréales.

L'influence quasi nulle des fortes doses de fumier sur le taux d'humus du sol doit être imputée aux irrégularités du terrain d'essai, la variation des teneurs en humus étant plus forte que l'augmentation prévisible par apport du fumier.

Reçu pour publication en mai 1976.

SUMMARY

COMPARISON OF THE EFFECTS OF FARMYARD MANURE AND MINERAL FERTILIZERS ON A SANDY « RECLAIMED PEAT » SOIL (SAPPEMEER, 1881-1934)

A fertilizer experiment was started in 1881 on a « reclaimed peat » soil of the beginning of the 17th century and previously treated with high amounts of town refuse compost and farmyard manure ; it continued until 1934 with the following treatments : farmyard manure, complete mineral fertilizer treatment and various combinations of major nutrients. The aim of this experiment, as established by a farmer, was to see whether it could be possible to substitute mineral fertilizers for farmyard manure without, in the long run, exhausting the soil.

This experiment demonstrated that the application of mineral fertilizers to a rotation of potatoes and cereals grown on this « reclaimed peat » soil (humus content 27 p. 100) could lead to better yields than the addition of 50-60 tons of farmyard manure per hectare without mineral fertilizers, as had been previously done. The combination of farmyard manure (50 p. 100) and of mineral fertilizers (50 p. 100) was not more beneficial as compared to the application fo mineral fertilizers alone.

Long-term applications of ammonium sulphate without periodical liming resulted in important reductions in the yields of cereals (rye and oats) and occasionally also of potatoes.

The effects of farmyard manure nitrogen during the year of application were less marked than had been observed in other experiments. However, one clear after-effect could be seen on cereals.

The humus percentage of soil was appearently not affected by the high amounts of farmyard manure applied ; however its effects may possibly have been concealed by the important fluctuations of humus percentage due to the variable site and the high humus content.

ZUSAMMENFASSUNG

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNG DER WIRKUNGEN DES STALLMISTES UND DER MINERALISCHEN DÜNGER AUF « TORFBEFREIETEM » SANDBODEN (SAPPEMEER, 1881-1934)

Auf einem am Anfang des 17ten Jahrhunderts « torfbefreieten » Boden, der vorher einer höhen Düngung in Form von Müll- und Mistkompost unterworfen war, wurde ein Düngungsversuch im Jahre 1881 aufgestellt und bis 1934 fortgesetzt, der aus den folgenden Behandlungen : Mistzufuhr, vollständige Mineraldüngung und verschiedene Kombinationen der Hauptelemente bestand. Der Zweck dieses von einem Bauern festgestellten Versuchs war zu bestimmen ob es möglich wäre, den Stallmist durch Mineraldünger zu ersetzen, ohne doss der Boden auf die Dauer sich erschöpft.

Es erwies sich auf diesem « torfbefreieten », 27 p. 100 Humus enthaltenden Boden möglich mit Mineraldüngern höhere Erträge als die vorher mit 50 zu 60 Tonnen Mist je Ha ohne Mineraldüngung in einer Kartoffel-Getreide Fruchtfolge erzielten Erträge zu erreichen. Die kombinierte Anwendung von Mist (50 p. 100) und Mineraldüngern (50 p. 100) ergab auch keine Vorteile im Verhältnis mit der alleinigen Mineraldüngung.

Die fortgesetzte Anwendung von Ammoniaksulfat ohne periodische Kalkdüngung verursacht grosse Ertragsabnahmen auf Getreide (Roggen und Hafer) und hin und wieder auch auf Kartoffel.

Die Wirkung des Miststickstoffs im Jahre seiner Zufuhr war kleiner als die in anderen Versuchen bekannte Wirkung. Es gab trotzdem eine deutliche Nachwirkung auf das Getreide.

Der Bodengehalt an Humus schien nicht von den gebrauchten hohen Gaben beeinflusst zu sein, aber die grosse durch die Geländeunregelmässigkeit bedingte Variation des Humusgehalts und der hohe Humusgehalt sollen diese Wirkung verhüllt haben.

РЕЗЮМЕ

Сравнительное изучение действия навоза и минерального удобрения на « обесторфенной » песчанной почве (Саппемеер, 1881-1934).

Л. К. Н. ДЕ ЛА ЛАНД КРЕМЕР.

На « обесторфенной » в начале 17-го века почве, и после предварительного внесения крупных количеств удобрения в виде кухонных отбросов и навоза, в 1881 был заложен опыт фертилизации, продолжавшийся до 1934-го года, со следующими вариантами обработки : навоз, полное минеральное удобрение и разные комбинации главных питательных элементов. Целью этого опыта, проведенного одним сельским хозяином, было установление возможности заменения навоза минеральными удобрениями, без риска последующего истощения почвы.

И, оказалось, что на « обесторфенной» почве, содержащей 27 % гумуса, возможно было получить с минеральным удобрением, в севообороте на

базе картофеля и злаков урожаи, превосходившие получавшиеся прежде при внесении 50-60-ти тонн одного только навоза/га. При применении комбинированного удобрения навозом (50 %) и минеральными удобрениями (50 %) полученные результаты тоже были не лучше чем при внесении одного только минерального удобрения.

Длительное применение сернокислого аммония, без периодических известкований, вызывало резкое понижение урожайности злаков (рожь и овес), а иногда и картофеля.

Эффект азота навоза, в год применения этого последнего, оказался более слабым чем во многих других опытах, но на злаках можно было наблюдать его четкое после-действие.

Применявшиеся крупные дозы навоза казалось не имели никакого влияния на содержание гумуса в почве, но очень возможно, что ывсокий уровень этого содержания и его сильные изменения в зависимости от неровностей местности, маскировали это влияние.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Handboek voor de akkerbouw, deel II, 1973, page 15, Proefstation voor de Akkerbouw, Wageningen.

Handboekje voor de lanbouwvoorlichter, 3e druk, 1967, Proefstation voor de Akker- en Weidebouw, Wageningen.

KOLENBRANDER G. J., 1974. Efficiency of organic manure in increasing soil organic matter content. *Trans. 10th Int. Congr. Soil Sci., Moscow*, II, 129-136.

KOLENBRANDER G. J., DE LA LANDE CREMER L. C. N., 1967. *Stalmest en gier. Waarde en mogelijkheden.* 188 pages, Veenman, Wageningen.

KORTLEVEN J., 1970. Resultaten verkregen in een vijfentwintigjarige stalmestproef op de proefboerderij te Borgercompagnie met een overzicht van de humusgehalten in dalgronden. *Inst. Bodemvruchtbaarheid, Intern Rapp.*, 1970-1, 63 pages.

MEYER C., 1934. Bemestingsproeven op het oude proefveld te Sappemeer in de jaren 1882-1932. *Versl. Landbouwkd. Onderz.*, **40** A, 939-1024.

MULDER A. G., 1895-1896. Bijlage van het rapport van de afdeling Hoogezand-Sappemeer over het vraagpunt « de twee stroomingen ». *Handelingen van het Genootschap van Nijverheid in de Provincie Groningen*, 62-65.

MULDER A. G., SJOLLEMA B., 1898. Bijdragen op het gebied der bemestingsleer. *Landbouwkd. Tijdschr.*, **6**, 263-296.

MULDER A. G., MEYER C., HUDIG J., 1918. Bemestingsproeven op het oude proefveld te Sappemeer in de jaren 1881-1915. *Versl. Landbouwkd. Onderz. Rijkslandbouwproefstn.*, **22**, 127-170.

MULDER A. G., MEYER C., HUDIG J., 1929. Bemestingsproeven op het oude proefveld te Sappemeer in de jaren 1885-1927. *Versl. Landbouwkd. Onderz. Rijkslandbouwproefstn.*, **34**, 5-24.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 791-801.

ÉTUDE DE L'ENTRETIEN DE L'HUMUS EN SOL NU OU CULTIVÉ, AVEC OU SANS FUMIER (GRONINGEN-HAREN, 1910-1970)

L. C. N. DE LA LANDE CREMER

Instituut voor Bodemvruchtbaarheid (Institut pour l'Étude à la Fertilité du Sol), Oosterweg 92, Haren, Gr. (Pays-Bas)

RÉSUMÉ

Un sol argilo-sablonneux avec 20 p. 100 de particules < 16 μm a été maintenu en jachère depuis 1910 avec une interruption de trois années de luzerne entre 1937-1939. En 1951, il y eut un dédoublement en une moitié nue et une cultivée, les deux parcelles étant encore une fois subdivisées en un traitement avec 15 tonnes de fumier par ha et an et un sans fumier (fig. 1). L'expérience, d'abord exploitée en plein champ à Groningen et sans répétitions, déménagea en 1967 avec l'institut vers Haren à 5 km au sud-est de cette ville. Ici elle fut poursuivie dans des cases en béton avec huit répétitions par traitement. Les données de cette expérience furent entre autres utilisées par KORTLEVEN (1964) dans ses recherches sur les aspects quantitatifs de l'élaboration et de la dégradation de l'humus dans le sol.

Jusqu'en 1961, il y eut un abaissement régulier du taux d'humus dans *le sol nu* (tabl. 2 et 3), de l'ordre de 1 p. 100 en moyenne de la réserve annuelle en humus ; cette diminution étant toutefois de 1,8 p. 100 par an dans les vingt premières années et de 0,6 p. 100 dans les trente suivantes. Après 1961, il y eut une importante augmentation du taux d'humus pour laquelle on n'a pas trouvé jusqu'à présent d'explication plausible.

Sur sol cultivé, dans la période 1910-1950, les résidus de récoltes maintinrent le taux d'humus à 2,2 p. 100. Le coefficient de dégradation de l'humus formé par ces résidus y compris les racines s'éleva à 1,5 p. 100 et fut d'un même ordre de grandeur que pour le sol sans aucun apport de matière organique.

Le fumier apporté sur le sol maintenu nu de 1910 à 1950 puis remis en culture en 1950, augmenta le taux d'humus de 0,59 p. 100 en valeur absolue, dont 0,32 p. 100 provenaient du fumier et 0,23 p. 100 des résidus de récoltes. La quantité d'humus formée à partir des résidus de récoltes peut être évaluée à 58 p. 100 de celle obtenue avec du fumier, à égalité de matière organique apportée. Il y a une bonne concordance avec la valeur de 55 p. 100 mentionnée par KOLENBRANDER (1974).

L'apport du fumier augmenta le taux d'azote du sol ainsi que les rendements, de 17 p. 100 en moyenne pour les pommes de terre, de 13 p. 100 pour les céréales et de 10 p. 100 pour les betteraves à sucre et cela, par rapport au traitement sans fumier. Ce résultat peut être, en majeure partie, imputé à l'action de l'azote du fumier, les autres éléments étant apportés en quantité suffisante.

L'effet de l'azote du fumier s'accentua au cours de la période 1950-1970, probablement à la suite d'une action cumulative des arrière-effets de celui-ci ; ces derniers, au début de l'expérience n'avaient pas encore d'influence.

I. — INTRODUCTION

Le taux d'humus est un des piliers importants pour la fertilité d'un sol. D'innombrables recherches furent donc entreprises et sont encore poursuivies pour étudier les aspects quantitatifs et qualitatifs de l'évolution de l'humus du sol. Les résultats d'essais de longue durée peuvent rendre de grands services dans ces études. La communication suivante décrit un tel essai de longue durée et en présente les enseignements. KORTLEVEN en traite dans sa dissertation sur les « Aspects quantitatifs de l'élaboration et de la dégradation de l'humus » (1963) ainsi que dans son rapport 9-1970, qui donne une description des résultats de la période 1910-1970. De plus, un mémoire de DE HAAN (1971) fut utilisé à ce sujet. L'expérience est toujours poursuivie.

II. — PLAN D'ESSAI

De 1910 à 1951, une expérience avec différentes formes d'engrais azotés fût conduite sur un champ d'essai dont le sol est argilo-sablonneux (20 p. 100 d'argile < 16 μm), situé près de l'ancien bâtiment de l'Institut pour la Recherche de la Fertilité des Sols à Groningen (transféré depuis 1967 à Haren, à 5 km au sud de cette ville).

Pour contrôler sa régularité, l'expérience fonctionna d'abord de 1904 à 1910 comme un essai en blanc (MASCHAUPT, 1936). Une partie resta en jachère, sauf dans les années 1937 à 1939 où il y eut une culture de luzerne. La partie nue fut travaillée chaque année et maintenue désherbée. La moitié de cette parcelle resta sans fumure, l'autre moitié reçut une fumure phosphatée, d'abord sous forme de phosphate monocalcique, ensuite sous forme de phosphate dicalcique.

A partir de 1951, la parcelle sans fumure resta nue et la parcelle avec fumure fut cultivée (fig. 1). Chaque parcelle fut subdivisée en deux ; l'une recevant annuellement 15 tonnes de fumier de bovins par ha et l'autre demeura sans fumier. Cette expérience fut conduite sur des parcelles de 3,5 × 5,3 m, sans répétitions ; les traitements furent donc les suivants :

1. sol nu, sans fumier ;
2. sol nu, 15 tonnes de fumier/ha/an ;
3. sol cultivé, sans fumier ;
4. sol cultivé, 15 tonnes de fumier/ha/an.

Le traitement 1 est donc la continuation sans modification du sol resté nu depuis 1911 (à l'exception de la période avec luzerne entre 1937 et 1939).

Lorsque l'institut déménagea en 1967 de Groningen vers Haren, à une situation à 5 km au sud-est par rapport à l'ancien emplacement, l'expérience déménagea également.

Période	Sol nu				Remarques
1910-1950	— P		+ P		essai en plein champ sans répétition
1951-1966	sol nu		sol cultivé		
	— fumier	+ fumier	— fumier	+ fumier	
1967-1976					essais en cases huit répétitions

FIG. 1. — *Évolution du plan des essais entre 1910 et 1976*

Les couches originelles du profil (0-20 cm, 20-30 cm, 30-50 cm et 50-80 cm) furent successivement excavées, séchées et chacune d'elles fut soigneusement mélangée. Ensuite des cases en béton de 1 m² furent remplies, en respectant l'ordre initial par couches successives de 5 cm d'épaisseur, et le profil reconstitué fut bien tassé jusqu'à ce que l'épaisseur d'origine fut rétablie. L'expérience compta dorénavant les mêmes traitements mais en huit répétitions, situées dans 2 × 4 blocs, chacun avec les quatre traitements distribués au sort (latin square double). L'expérience est toujours poursuivie!

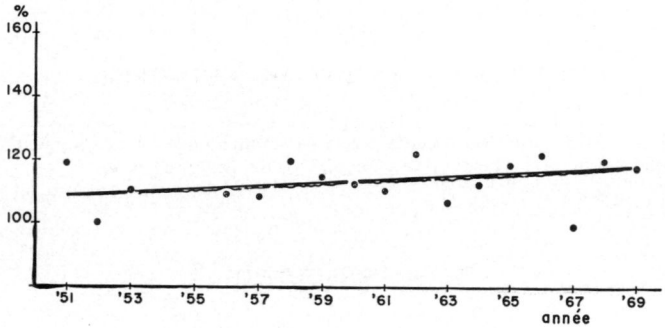


FIG. 2. — *Rendements du traitement avec fumier en pourcentage de ceux obtenus sans fumier*

III. — LES FUMURES

Une dose de 15 tonnes de fumier de bovins apporte selon les normes actuelles à peu près 2 100 kg de matières organiques, 83 kg d'azote total, 57 kg de P_2O_5, 53 kg de K_2O et 23 kg de MgO (KOLENBRANDER et DE LA LANDE CREMER, 1967). L'efficacité de l'azote du fumier par rapport à celle de l'azote minéral est de 40 p. 100 lorsque la fumure s'effectue au printemps et de 20 p. 100 lorsqu'elle a lieu à l'automne.

Jusqu'en 1970, l'apport en éléments nutritifs ne fut pas compensé sur le traitement fumier.

Jusqu'en 1957, les engrais minéraux ne furent utilisés que sur les parcelles cultivées (qui avaient reçu au préalable des phosphates dans la première période de l'essai). De 1957 à 1961, la fumure des parcelles nues varia et devint ensuite uniforme (tabl. 1).

TABLEAU I

Fertilisation minérale en kg par ha (période 1951-1969)

Traitement	N			P_2O_5			K_2O		
	1951-1956	1957-1960	1961-1969	1951-1956	1957-1960	1961-1969	1951-1956	1957-1960	1961-1969
1 sol nu, — (1)	—	30	101	—	35	67	—	100	156
2 sol nu, +	—	30	101	—	35	67	—	100	156
3 cultivé, —	87	60	101	80	50	67	175	130	156
4 cultivé, +	82	60	101	80	50	67	175	130	156

(1) Sans — ou avec + fumier.

Avant 1951, la moitié phosphatée de l'expérience reçut en moyenne annuellement 75 kg de P_2O_5 par ha. Pendant la période avec luzerne (1937-1939), 100 kg de P_2O_5 et 300 kg de K_2O par ha furent épandus en 1937 sur l'ensemble de l'essai.

En 1938, il n'y eut pas de fumure et en 1939, la moitié phosphatée reçut encore une fois 100 kg de P_5O_2.

En 1955, 30 kg d'N/ha furent apportés au lin mais seulement sur la parcelle cultivée sans fumier. On n'osa pas donner de l'azote minéral au traitement avec fumier.

IV. — LA ROTATION DE CULTURES

La rotation de cultures des traitements 3 et 4 est mentionnée au tableau 6. C'est seulement depuis 1960 qu'elle devint fixe : betteraves à sucre, avoine, pommes de terre.

V. — RÉSULTATS

Analyses chimiques du sol

Les tableaux 2 et 3 donnent les taux d'humus des sols respectivement de 1910 à 1950 et de 1950 à 1970 (1950-1967 ; 1967-1970). Ces taux furent obtenus selon la méthode Istcherekov (oxydation au permanganate).

TABLEAU 2

Taux d'humus en pourcentage (période 1910-1951)

Année	Sol nu	Sol cultivé	Différence
1911	2,3	2,2	— 0,1
1916	2,0	2,3	0,3
1923	1,9	2,2	0,3
1928	1,7	2,2	0,5
1931	1,7	2,2	0,5
1932	1,7	2,2	0,5
1933	1,6	2,2	0,6
1937	1,7	2,2	0,5
1940	1,7	2,2	0,5
1941	1,7	2,1	0,4
1950	1,5	2,3	0,8
Moyenne		2,2	

Les taux d'azote total des sols (mg N par 100 g de sol) d'après Kjeldahl et pour la période 1950-1972 sont mentionnés au tableau 4.

Les autres données des analyses chimiques du sol pour autant qu'elles soient utiles à la compréhension de quelques autres résultats de cette expérience sont des déterminations faites en 1950 et en 1969 sur la partie cultivée de l'expérience (tabl. 5).

TABLEAU 3

Taux d'humus en pourcentage (périodes 1950-1966 et 1967-1970)

Année	Sol nu		Sol cultivé	
	sans fumier	avec fumier	sans fumier	avec fumier
1950	1,5	1,5	1,5	1,5
1953	1,7	1,7	1,7	1,9
1955	1,9	2,1	1,5	2,0
1957	1,5	1,7	1,7	1,8
1958	1,6	1,7	1,7	2,0
1960	1,4	1,7	1,6	2,0
1961	1,5	1,8	1,7	2,0
1963	1,67	1,97	1,90	2,25
1964	2,26	2,14	2,09	2,41
1965	1,89	2,04	1,89	2,24
1966	2,26	2,14	1,94	2,25
(après déménagement de l'expérience)				
1967	1,63	1,94	1,86	2,27
1968	1,60	1,93	1,84	2,20
1969	1,59	1,92	1,83	2,22
1967-1969	1,61	1,93	1,84	2,20

TABLEAU 4

N-total en mg par 100 g de sol

Traitement	1955	1957	1958	1960	1965	1967	1969	1971
1 sol nu, — (1)	74	77	74	75	80	70	70	69
2 sol nu, +	79	84	76	87	90	90	90	87
3 cultivé, —	75	88	73	84	80	80	80	83
4 cultivé, +	75	90	93	104	100	100	100	105

(1) Sans — et avec + fumier.

Rendements

Les rendements des traitements cultivés depuis 1951 figurent au tableau 6. La fumure minérale fut égale pour les deux traitements, sauf en 1955. L'apport d'éléments nutritifs par le fumier ne fut donc pas compensé.

En 1955, il fut cultivé du lin. On n'osa pas donner alors de l'azote minéral au traitement avec fumier. Le traitement minéral n'obtint que 30 kg de N par ha, une quantité négligeable par rapport à la période 1950-1970. Malheureusement les rendements des années 1954 et 1955 se sont perdus.

TABLEAU 5

Analyses chimiques du sol de la partie cultivée de l'expérience
(années 1950 et 1969)

	Sol cultivé			
	sans fumier		avec fumier	
	1950	1969	1950	1969
P-citr. (1) et P-AL (2)	75	61	75	71
K-HCl (3)	11	23	11	25
MgO (4)	78 (7)	70	85 (7)	100
N-total (5)	75 (6)	80	75 (6)	100
pH-KCl	7,1	7,5	7,1	7,4

(1) P-citr. en 1950 : P_2O_5 en mg/100 g de sol déterminé à l'acide citrique à 1 p. 100.

(2) P-AL en 1969 : P_2O_5 en mg/100 g de sol déterminé d'après la méthode à l'ammoniac acide acétique.

(3) K déterminée avec 0,1 n HCl, en mg/100 g de sol.

(4) MgO, déterminée avec 0,5 n NaCl, en mg/kg de sol.

(5) N-Kjeldahl en mg/100 g de sol.

(6) analyse de 1955.

(7) analyse de 1953.

TABLEAU 6

Rendements (1) *du traitement sans fumier* (3) *en kg/are et avec fumier* (4) *en pourcentage de celui-ci*

Année	Culture	Cultivé sans fumier (kg/are)	Cultivé avec fumier (5) (%)
1951	pommes de terre	338	118,6
1952	maïs	69	100,4
1953	froment de print.	117	110,3
1954	pommes de terre (2)	—	—
1955	lin (2)	—	—
1956	pommes de terre	378	109,2
1957	avoine	119	108,5
1958	pois	71	120
1959	pommes de terre	372	114,5
1960	avoine	90	112,6
1961	betteraves sucr.	1 029	109,8
1962	pommes de terre	408	122,1
1963	avoine	121	106,8
1964	betteraves sucr.	999	112,9
1965	avoine	140	118,6
1966	pommes de terre	505	121,4
1967	betteraves sucr.	1 292	98,8
1968	avoine	114	119,8
1969	pommes de terre	478	117,8

(1) En tubercules pour les pommes de terre ; en grains + paille pour les céréales et pois ; en grains pour le maïs ; en racines + feuilles pour les betteraves.

(2) Ces rendements se sont perdus.

VI. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

A la suite d'une rotation de cultures non systématique durant les premières 40 années (1911-1950) et comprenant 25 p. 100 de céréales, 20 p. 100 de cultures sarclées, 22,5 p. 100 de cultures industrielles et 32,5 p. 100 de légumineuses (trèfle rouge, luzerne, pois et fèves), le taux d'humus d'un sol argilo-sablonneux avec 20 p. 100 d'argile < 16 μm put se maintenir à 2,2 p. 100 (tabl. 2). Il y eut donc un équilibre entre élaboration d'humus provenant des résidus de récoltes et la dégradation de l'humus du sol.

Jusqu'en 1961 le taux d'humus du sol nu s'abaissa régulièrement (tabl. 2 et 3). Cette diminution peut être estimée à 1 p. 100 en moyenne de la réserve en humus du début de l'année ; celle-ci atteint cependant 1,8 p. 100 en moyenne pendant les vingt premières années et 0,6 p. 100 dans les trente suivantes.

Après 1961 il y eut assez curieusement un accroissement assez important du taux d'humus en sol nu sans qu'il y ait une explication plausible à ce phénomène.

Durant la période 1911-1950, le taux d'humus a augmenté de 0,9 p. 100 en valeur absolue sur le sol remis en culture, ce qui représente 27 000 kg /ha dans la couche arable (0-20 cm). KORTLEVEN (1963) calcula, pour cette période, un apport annuel moyen de 2 500 kg de matière organique provenant des résidus de récoltes et une élaboration d'humus par celui-ci de 900 kg (coefficient d'humification calculé à 36 p. 100). De ceci résulte, pour la dite période, un coefficient de dégradation de 1,5 p. 100 pour l'humus formé à partir des résidus de récoltes. Ce coefficient est du même ordre de grandeur que celui de l'humus du sol nu ne recevant aucun apport de matière organique, ce à quoi il fallait du reste s'attendre pour une situation humique en équilibre.

Après 1950, lorsque le sol resté nu auparavant fut subdivisé suivant les quatre traitements mentionnés au paragraphe II (fig. 1), il y eut à nouveau une augmentation sensible du taux d'humus du sol cultivé due aux résidus de récoltes, et celle procurée par le fumier utilisé fut légèrement supérieure (tabl. 3). Les analyses de la période 1967-1969, basées sur huit répétitions et de ce fait de loin les plus précises, indiquent une augmentation du taux d'humus de 0,32 p. 100 en valeur absolue pour le sol nu avec fumier et de 0,23 p. 100 pour le sol cultivé sans fumier par rapport au taux d'humus du sol nu sans fumier (tabl. 3). L'augmentation de 0,59 p. 100 constatée sur sol cultivé avec fumier correspond pratiquement à la somme des augmentations des deux premiers traitements et a rétabli le niveau d'humus du sol cultivé à sa valeur initiale (période 1910-1950) (tabl. 2).

L'augmentation d'humus par le fumier fut plus grande que par les résidus de récoltes. Avec 15 tonnes de fumier l'apport en matière organique est de 2 100 kg/ha. L'apport par les résidus de cultures (pommes de terre, betteraves à sucre, avoine) peut être estimé à 2 600 kg (Handboek voor de Akkerbouw, 1973).

Dans le premier cas, la différence du taux d'humus résultant de l'utilisation du fumier étant de 0,32 p. 100 comporte une augmentation de (0,32 : 2 100) 1 000 = 0,1524 p. 100 par tonne de matière organique utilisée. Dans le second cas, 2 600 kg de résidus organiques de cultures augmentèrent le taux d'humus de 0,23 p. 100, soit

(0,23 : 2 600) 1 000 = 0,0885 p. 100 par tonne. La quantité d'humus formée à partir des résidus de cultures équivaudrait donc à : (0,0885 × 100) : 0,1524 = 58 p. 100 de celle provenant du fumier, l'apport de résidus de récolte et de fumier étant initialement le même, valeur qui correspond fort bien à celle de 55 p. 100 trouvée par KOLENBRANDER (1974).

D'après les analyses de 1971 (tabl. 4), le taux d'azote du sol fut accru par le fumier de vingt mg N pour 100 g de sol par rapport à celui du traitement sans fumier. Sur une couche arable de 3 000 T, il y eut donc une augmentation de 600 kg d'azote/ha dans les traitements avec fumier.

La combinaison fumure minérale fumier occasionna, sauf quelques exceptions, une augmentation moyenne des rendements par rapport au traitement sans fumier de 17 p. 100 chez les pommes de terre, de 13 p. 100 chez l'avoine et le froment et de 11 p. 100 chez les betteraves à sucre (tabl. 6). Comme l'état de fertilité chimique des traitements cultivés peut être caractérisé comme bonne à élevée (tabl. 5) et que l'approvisionnement en phosphate, potasse et magnésie fut amplement suffisant (tabl. 1 et 5), l'effet du fumier doit surtout être dû à son azote. Cet effet s'accentua au cours de la période 1950-1970, ce qu'il faut imputer à une action cumulative des arrière-effets de l'azote organique minéralisée au cours de l'expérience.

VII. — CONCLUSIONS

Le taux d'humus d'un sol argilo-sablonneux avec 20 p. 100 d'argile < 16 μm maintenu en jachère a régulièrement diminué. Au cours des vingt premières années, il y eut une baisse de 1,8 p. 100 en moyenne de la réserve annuelle d'humus et dans les trente années suivantes de 0,6 p. 100.

Les résidus de cultures avec un apport annuel moyen de 2 500 kg de matière organique par ha ont par contre maintenu le taux d'humus à 2,2 p. 100 sur le sol cultivé.

L'utilisation de 15 tonnes de fumier par ha et an augmenta le taux d'humus du sol maintenu nu auparavant davantage que l'apport en plus grande quantité de résidus de récoltes. Pour une même quantité de matière organique apportée, les résidus de récoltes ne produisèrent que 58 p. 100 de la quantité d'humus élaborée par le fumier.

L'utilisation annuelle de fumier a accru la réserve d'azote du sol et, par le biais de celle-ci, l'efficacité du fumier comme source d'azote pour la plante a été augmentée à la suite d'une accumulation des arrière-effets provenant de l'azote organique minéralisée graduellement.

Reçu pour publication en mai 1976.

SUMMARY

STUDY OF THE HUMUS MAINTENANCE IN A BARE OR CULTIVATED SOIL WITH OR WITHOUT MANURE SUPPLY (GRÖNINGEN/HAREN, 1910-1970)

A sandy-clay soil with 20 p. 100 particles < 16 μm was laid fallow since 1910 with a break of three years with lucerne growing between 1937 and 1939. In 1951 the plot was divided into two halves, one laid bare and the other cultivated, these plots were divided another time, one being supplied with 15 tons manure pro ha and year and one unmanured (fig. 1). The experiment which was first carried out under field conditions in Gröningen without replicate was removed in 1967 with the Institute towards Haren, at 5 km of this town south eastward. It was resumed here in concrete bins with eight replicates for each treatment. The datas obtained by this experiment have been used along others by KORTLEVEN (1964) for his research work on the quantitative aspects of humus formation and degradation in soil.

Up to 1961 there was a regular drop in the humus content of bare soil (table 2 and 3) which reaches about 1 p. 100 of the yearly humus reserve on an average ; this drop reaching however 1.8 p. 100 pro year during the first twenty years and 0.6 p. 100 during the thirty following ones.

After 1961 there was an important increase of the humus content which is not yet satisfactorily explained.

On the cultivated soil, between 1910 and 1950, crop residues maintained the humus content at 2.2 p. 100. The degradation coefficient of the humus formed by these residues including the roots reached 1.5 p. 100 and was of the same order as for the bare soil without any organic matter supply.

The manure supplied on the soil laid fallow from 1910 to 1950 and then cultivated again in 1950 induced a 0.59 p. 100 (absolute value) increase in the humus content : 0.32 p. 100 came from the manure and 0.23 p. 100 from crop residues. The amount of humus formed out of crop residues may be evaluated to 58 p. 100 of the amount obtained with manure for a same organic matter supply. It is in good agreement with the value of 55 p. 100 quoted by KOLENBRANDER (1974).

Manure supply increased the soil content in nitrogen as well as the yields : 17 p. 100 for the potatoes, 13 p. 100 for the cereals and 10 p. 100 for the sugar beet on an average as compared with the treatment without manure. This result may be attributed for a great part to the action of manure nitrogen, the other elements being supplied in sufficient amounts.

The effect of manure nitrogen increased between 1950 and 1970 probably as a consequence of the cumulative action of its after-effects ; the latter had no influence yet at the beginning of the experiment.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER HUMUSERHALTUNG IM BEBAUTEN UND UNBEBAUTEN BODEN MIT UND OHNE MISTANWENDUNG (GRÖNINGEN/HAREN, 1910-1970)

Ein sandiger Lehnboden mit 20 p. 100 Teilchen < 16 μm lag seit 1910 mit einer dreijährigen Luzernenunterbrechung in 1937-1939 brach. In 1951 wurde die Fläche in eine bebaute Hâlfte und eine unbebaute aufgeteilt ; beide Parzellen wurden noch weiter in eine Behandlung mit 15 t Mist/ha/Jahr und eine andere ohne Mistanwendung unterteilt (Abb. 1). Der Versuch, der zunächst in Freiland in Gröningen und ohne Wiederholung durchgeführt wurde, zog in 1967 mit dem Institut nach Haren 5 km südöstlich von der Stadt um.

Er wurde dann in Betonkästen mit acht Wiederholungen in jeder Behandlung weitergeführt. Diese Versuchsdaten wurden *u.a.* von KORTLEVEN (1964) in seinen Untersuchungen über die quantitativen Gesichtspunkte der Humusbildung und des Humusabbaus im Boden verwendet.

Bis 1961 trat eine regelmässige Abnahme des Humusanteils im unbebauten Boden von circa durchschnittlich 1 p. 100 des jährlichen Humusvorrats ein (Tabellen 2 und 3) ; jedoch betrug diese Abnahme 1,8 p. 100 pro Jahr während der zwanzig ersten Jahre und 0,6 p. 100 während der dreissig weiteren.

Nach 1961 kam ein beträchtlicher Anstieg des Humusanteils vor, wofür bisher noch keine befriedigende Erklärung gefunden ist.

Im bebauten Boden wurde der Humusanteil in 1910-1950 bei 2,2 p. 100 durch die Ernterückstände erhalten. Der Abbaukoeffizient des von diesen Rückständen einschliesslich Wurzelresten gebildeten Humus lag bei 1,5 p. 100 ; dieser Betrag war so gross wie im unbebauten Boden ohne Zufuhr von organischer Substanz.

Infolge der Mistanwendung auf den zwischen 1910-1950 unbebauten und dan in 1950 wiederangebauten Boden stieg der Humusanteil um 0,59 p. 100 an (absoluter Wert), 0,32 p. 100 davon stammte aus Mist und 0,23 p. 100 aus den Ernterückständen. Die aus Ernterückständen gebildete Humusmenge kann bei 58 p. 100 der mit Mist gewonnenen Menge bei gleicher Zufuhr organischer Substanz gewertet sein. Dieser Wert stimmt mit den von KOLENBRANDER (1974) angegebenen 55 p. 100 gut überein.

Gegenüber der Behandlung ohne Mist liess die Mistgabe den Stickstoffgehalt im Boden sowie die Erträge um durchschnittlich 17 p. 100 für Kartoffeln, 13 p. 100 für Getreide und 10 p. 100 für Zuckerrüben ansteigen.

Dieses Ergebnis kann grösstenteils auf die Miststickstoffwirkung zurückgeführt wereden, da die anderen Stoffe in ausreichender Menge gegeben wurden.

Die Miststickstoffwirkung wurde stärker während 1950-1970, was wahrscheinlich durch die kumulativen Nachwirkungen bestimmt wurde, die am Versuchsanfang noch keinen Einfluss ausgeübt hatten.

РЕЗЮМЕ

Изучение поддержания содержания гумуса в голой и культивируемой почвах, со внесением навоза, или без него (Гронинген-Харен, 1910-1970).

Л. К. Н. ЛЕ ЛА ЛАНД КРЕМЕР.

Глинисто-песчанная почва с 20 % частичек 16 мм содержалась под паром с 1910-го года, с перерывом в три года с 1937 до 1939 (культура люцерны). В 1951 почва эта была разделена на 2 делянки : одну голую, другую под культурой, и обе эти делянки разделены в свою очередь на одну, получавшую 15 тонн навоза/га в год, и другую — навоза не получавшую (рис. 1). Опыт начавшийся в поле, расположенном в окрестностях Гронигена, без повторностей, в 1967 был перенесен вместе с Иистутом в окрестности Харен, в 5-ти километрах от этого города. Здесь опыт продолжался на бетонированных делянках с 8-ью повторностями для каждого варианта. Данные этого опыта были, между прочим, использованы Кортлевеном (1964) при изучении количественных аспектов образования и деградации гумуса в почве. В голой почве наблюдалось, до 1961-го года, регулярное уменьшение содержания гумуса (таблицы 2 и 3), представлявшее в среднем приблизительно 1 % его годового запаса; уменьшение это достигало 1,8 % в год в течении двадцати певых лет опыта и 0,6 % — в течении 30-ти последующих лет. После 1961-го года отмечено было крупное увеличение этого содержания, увеличение для которого не найдено до сих пор удовлетворительного об' яснения.

В культивировавшейся почве — пожнивные остатки поддерживали содержание гумуса на постоянном уровне в период от 1910 до 1950 года (2,2 %). Коэффициент деградации гумуса образованного этими остатками, включая и корни, достигал 1,5 %, и для голой почвы, в которую не было внесенно никакого органического вещества, процент этот был приблизительно того-же порядка.

Навоз, внесенный в почву остававшуюся голой с 1910 до 1950, а затем снова занятую культурами, увеличил начиная с 1950 содержание в ней гумуса на 0,59 %, из которых 0,32 % приходились на долю навоза, и 0,23 % — на долю пожнивных остатков. При одинаковых количествах внесенного органического вещества, количество гумуса образованного этими остатками может быть оценено в 58 % количества полученного от навоза. Это хорошо совпадает с цифрой (55 %) указывавшейся Коленбрандером (1974).

Внесение навоза увеличивало содержание азота в почве и урожаи, по сравнению с вариантами без навоза. Эти увеличения составляли в среднем : 17 % для картофеля, 13 % для злаков и 10 % для сахарной свеклы. Эти результаты получены были, главным образом, за счет действия азота навоза, в случаях когда количество других внесенных элементов было достаточным.

Эффект действия азота навоза усилился с 1950 до 1970, очевидно благодаря кумулятивному влиянию его последействий, не имевших значения в начале опыта.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

HAAN S. DE, 1971. Invloed van bebouwing en van bemesting met stalmest op grond en gewas van het proefveld Pr 1 (1911-1950), Pr 1265 (1951-1966) en Vp 859 (1967-1971). Mémoire non publié.

HANDBOEK VOOR DE AKKERBOUW, deel II, 1973, page 31, Proefstation voor de Akkerbouw, Wageningen.

KOLENBRANDER G. J., 1974. Efficiency of organic manure in increasing soil organic matter content. *Trans. 10th Int. Congr. Soil Sci.*, Moscow, II, 129-136.

KOLENBRANDER G. J., DE LA LANDE CREMER L. C. N., 1967. *Stalmest en gier. Waarde en mogelijkheden.* 188 pages, Veenman, Wageningen.

KORTLEVEN J., 1963. Kwantitative aspecten van humusopbouw en humusafbraak. *Versl. Landbouwkd. Onderz.*, **69** (1), 109 pages.

KORTLEVEN J., 1970. Verslag over het verloop der humusgehalten gedurende zestig jaar in een onbebouwde zavelgrond. *Inst. Bodemvruchtbaarheid, Rapp.*, 9-1970, 27 pages.

MASCHAUPT J. G., 1936. Het zavelproefveld van het Rijkslandbouwproefstation te Groningen in de jaren 1911-1934. *Versl. Landbouwkd. Onderz.*, **42**, 543-647.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 803-818.

RESULTS OF A 70 YEARS LONG-TERM ROTATION AND FERTILIZATION EXPERIMENT IN THE MAIN CEREAL GROWING AREA OF AUSTRIA

O. STEINECK and P. RUCKENBAUER

Institute of Crop Husbandry and Plant Breeding,
University of Agriculture, Gregor Mendelstrasse 33,
A-1180 Vienna (Austria)

SUMMARY

Results are presented of the long term crop rotation and fertilization experiment in Grossenzersdorf/Austria, which was established in 1906 with plot arrangements and treatments continuously maintained up to the presence. With regard to the initial aim of this experiment, the following results and conclusions could be obtained :

1. Continuous rye cropping led to yield depressions, which cannot be reduced by mineral fertilization and farmyard manure treatments.

2. The influence of the 3 different treatments (no fertilization, application of mineral fertilizer and farmyard manure) on the yield levels was found to be greater in spring barley than in winter rye. In the long term observations, the yield of the mineral-fertilized plots were always higher than in the other 2 treatments compared.

3. Mineral fertilization and farmyard manure fertilization increased significantly the yield components ears/m² and grain number/ear, whereas the thousand kernel weights were kept at a nearly constant level.

4. The quality of the rye grains, tested with the characters protein content, amino-acid patterns, vitamin contents and baking characteristics was found to be not very different in all the treatments performed.

No disadvantageous effects on soil fertility, yield levels and nutritional or processing quality of the rye grains could be found with exclusive application of mineral fertilizers in comparison with the application of farmyard manure or no fertilizers at all.

INTRODUCTION

The fundamental investigations by LIEBIG in the middle of the past century in the field of plant nutrition opened a new area for the fertilization of agricultural crops. The « mineral theory » was scientifically proved by the culture solution experiments of KNOP and SACHS. These experiments could show that the higher plants

can be cultivated, without any impairment of growth and development, with mineral nutrients only. This basis for the use of minerals for plant cultivation and production stimulated both research and a new industry for the production of fertilizers. As early as in 1843 the first factory was founded in England by LAWES for the commercial production of superphosphate. Together with this development the foundation of the oldest agricultural research station in the world took place in Rothamsted. From this date, many experimental stations were founded in several European countries. Among their scientific tasks was the establishment of experiments to compare the effect of the new mineral fertilizers with that of hitherto used organic manures. In 1878, J. KÜHN started experiments of that kind at the newly established University research station in Halle/Germany. He combined these comparative field trials with rotation experiments, in order to study long-term effects of fertilization and crop rotation together.

A student of KÜHN, A. v. LIEBENBERG DE ZSITTIN, who was appointed in 1884 as professor of Plant Production at the University of Agriculture in Vienna, started in 1906 a similar long-term experiment in the main agricultural area in the north-east of Lower Austria. Exactly following the layout in Halle, LIEBENBERG established a field trial at the University experimental farm in Grossenzersdorf, which is treated and maintained up to the present time exactly according to the plans and treatments designed at the beginning of the experiment. This field trial, which comprises an area of 4 000 m², is divided into 4 long-plots and split into two parts. Wheras in the neighbouring first 3 plots the old 3 field rotation (winter rye-spring barley — fallow) is performed, a continuous rye cropping is carried out on the 4th plot. Each plot is divided into 3 sub-plots and one not fertilized at all, the second exclusively treated with mineral fertilizers and the remaining third only treated with farmyard manure.

These investigations were to answer two questions :

1. Is it possible to replace self-produced organic fertilizers completely by mineral fertilizers ?

2. To what extent are the different systems of fertilization able to compensate rotation disorders, such as the continuous cropping of winter rye ?

In order to clarify these important questions, soil investigations and yield determinations were performed. From these data, aspects of maintaining soil fertility by different systems of fertilization should be studied and compared, particularly in monocultures. Unfortunately, very important results and continuous protocols of this trial were destroyed by war events in 1945, and from 1960 onwards, mainly aspects of crop husbandry were studied and analyzed. This very long term field trial gave us the chance and the possibility to evaluate the actual effects of « natural fertilizers » and mineral « fertilizers » over a long period. In particular we were able to test exactly the long term influence of both fertilization systems on the nutritional quality of agricultural products.

Therefore, extensive investigations into their baking characteristics and the nutrient contents of winter rye grains were performed. With these results, exact comparisons were possible and new scientific material was obtained especially for the discussion « biological farming » versus « conventional farming ».

METHODS AND MATERIAL

For the characterization of the location, a short description is given of the climate and the soil conditions.

The climate

For the « Marchfeld plain », an area of about 100 000 hectares north-east of Vienna with intensive farming, the location of the trial is representative. The climate is a transition climate between the oceanic conditions in Western Europe and the continental climate of Eastern Europe. From the 60 summers between 1901 and 1960, more than half were classified as warm, dry and sunny (continental summers), only 18 were described as cold, wet and cloudy (oceanic summers) (STEINHAUSER *et al.*, 1955). These conditions are presented in a long term diagram after WALTER (1970) in figure 1.

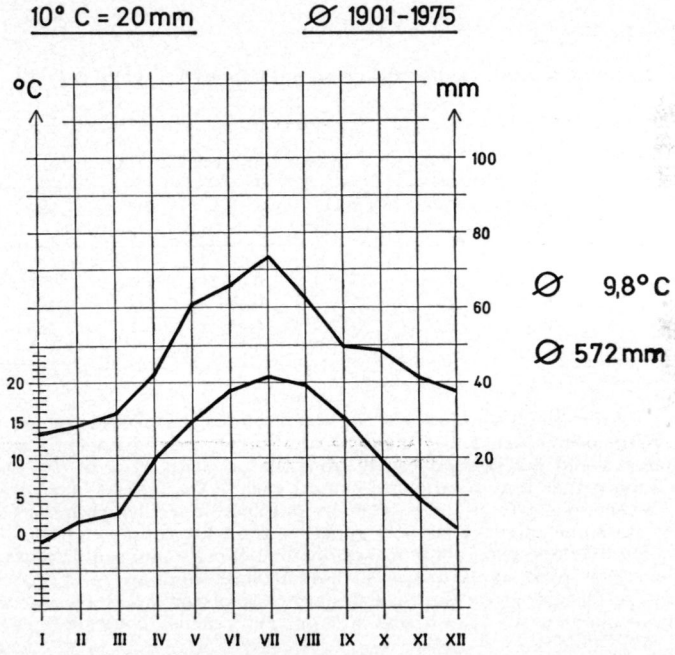


FIG. 1. — *Long-term climatic conditions in Grossenzersdorf/Austria* (1901-1975)

Here the lower curve presents the yearly distribution of the temperature, the higher one indicates the rainfall distribution. The lowest temperature in Grossenzersdorf is found with — 1.2°C in January, the highest temperature in July with an average of 20.1°C. Because of the high occurance of thunderstorms, in July, the maximal precipitation is also found in that month. The type of climate is a typical summer — rain climate ; maxima of precipitation were found in 1932 (367 mm) and 1965 (915 mm). In some years a negative water balance is found in April and May, which causes sometimes very unfavourable droughts. New investigations by MÜLLER (1971) have shown that with statistical significance among 10 vegetation periods from April to October one month can be expected with a water deficit of — 170 mm and one month with a surplus of + 95 mm.

In the classification of world climates after KÖPPEN (1961), the « Marchfeld area » belongs to the Cfb climates, the « moderate warm rain climate » : C stands for the temperature of the coldest month. With — 1.2°C, our location is on the margin of the C-climate, which has a range from — 3°C to + 18°C ; f is a symbol sufficient rainfall in all month as the normal event, in other

words no occurance of droughts. The term b indicates that at least during 4 months, the average temperature is above 10°C. When comparing this climate with analogous climates on the earth, only two areas in the northern hemisphere can be mentioned. First the western border between Canada and the United States and second South-Korea and Northern Japan. In the first-mentioned area, higher precipitation and a winter rain period is observed. In the other two areas, a greater variation in temperature and precipitation is extant.

The soil conditions

The soil of the location Grossenzersdorf can be described as tchernosem-like, hydromorphic soil. It is a deep, medium heavy soil with increasing clay content in the lower horizons. The A_p-horizon has a dimension of about 0-25 cm, followed by a A-horizon down to 55 cm, which consists mainly of heavy clays. Thick gravel formations are located in a depth of 90-150 cm.

The medium texture at 0-100 cm is characterized by 24.7 p. 100 clay, 64.1 p. 100 silt, 10.2 p.100 fine sand and 1.0 p. 100 gravel. The soil has the tendency to compact and to form crusts. After an above average harvest the following soil nutrients were found in the field plots with continuous rye cropping (autumn 1974) (table 1).

TABLE I

Nutrient contents in the soil of the continuous rye plots (1974)

Treatment	mg per 100 g/1 000 g* soil						
	P_2O_5	K_2O	$CaCO_3$	Br (%)	Cu*	Mn*	pH in $CaCl_2$
No fertilization	9	7	24.1	0.07	4.0	170	6.9
Mineral fertilizer	20	22	25.3	0.07	6.2	160	7.1
Farmyard manure	35	54	23.7	0.09	6.2	185	7.1

There are significant differences between the differently treated plots in regard to phosphorus and potassium. With 9 mg P_2O_5 and 7 mg K_2O, the soil without any fertilization since about 70 years is exhausted and differs significantly from the nutrient levels of the two other plots. The continuous supply of 20 tons of farmyard manure each year over this long period established a relatively high level of phosphorus and potassium. The amount of calcium in the 3 soils compared is approximately the same, slight differences appear only in the copper content.

In connection with these two environmental factors, climate and soil, it must be mentioned that both of them have great similarities with those at Halle/Germany, where a continuous rye cropping has been performed since 1859 : the trials were also placed in a black soil ; the yearly temperature average is about 9° and the rainfall amount per year is about 500 mm (SCHMALFUSZ, 1957).

The trial layout

As a copy of the « Everlasting rye cropping » in Halle, our long term experiment consists of 4 rectangular field plots with exactly 1 000 m² each and is located in a very even field area. Each plot is split into 3 equal sub-plots. The cultivation and treatments are maintained since the establishment of the trial in such a way that one sub-plot does not receive any fertilization, the following one is fertilized exclusively with mineral fertilizers and the third sub-plot is manured each year with about 20 tons of farmyard manure. In the first 3 trial plots, the old three field-rotation with winter rye-spring barley-fallow is performed, wheras in the 4th plot, a continuous winter rye cropping is maintained (fig. 2).

The different trial plots are fertilized with the following amounts (see table 2).

Concerning the mineral fertilizers it should be mentioned that nitrogen is applied as a top dressing in form of ammonium nitrate ; phosphorus and potassium applied in autumn before ploughing are given as resp. superphosphate and potassium chlorid.

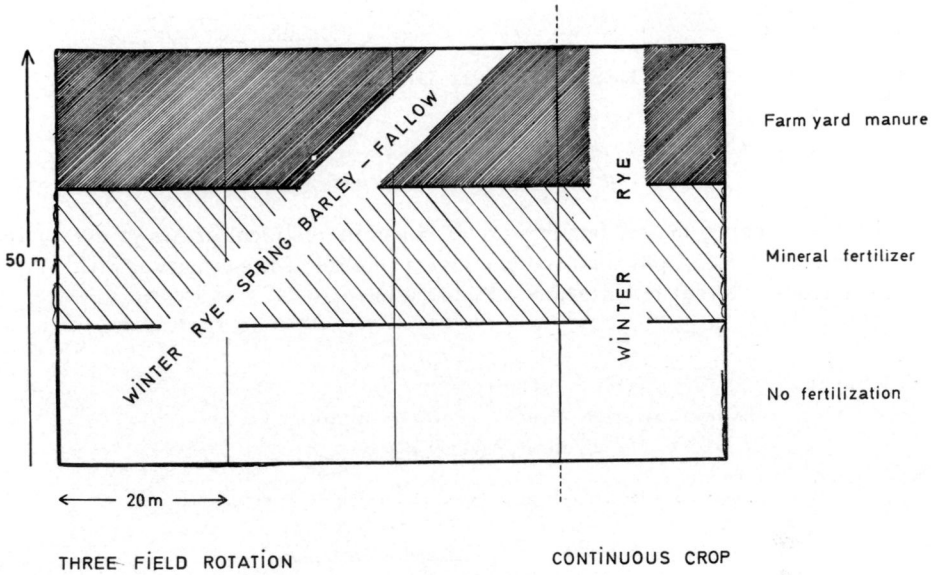


FIG. 2. — *Plan and layout of plots in the very long-term fertilizer and rotation experiment in Grossenzersdorf/Austria*

TABLE 2

Yearly fertilization of the long term fertilizer experiment (kg/hectare)

Plot	Farmyard manure	N	P_2O_5	K_2O
No fertilization	—	—	—	—
Mineral fertilizer	—	117 kg/ha	100 kg/ha	150 kg/ha
Farmyard manure	20 000 kg/ha	110-116	75-84	116-125

After the usual cultivation dressings in autumn, the plots with winter rye have been sown since 1932 with the Austrian variety « *Tschermaks Marchfelder* », one of the oldest cultivars still kept on the variety list. The seeding rate is about 180 kg/hectar, the basis for calculation each year is a sowing density of 500 kernels/m².

The spring barley plot is sown usually with top yielding varieties, tested under our conditions. In the last years mainly the varieties « *Eura II* » and « *Probstdorfer Adora* » have been used. Since 1950, chemical control of weeds has been performed, before that date manual hoeing was employed. Each year the straw has been completely removed from the plots.

The performance and evaluation of these trials

The simple biometrical design of these trials without any replication is limiting for the interpretation of the results achieved. Very exact yield data are available since 1960; from 1970 onwards yield components were analysed. Various chemical analyses were performed on the grains of the continuous winter rye plot, such as mineral contents, proteins and amino acid patterns, baking quality tests and vitamin contents. The evaluation was performed according to standardized methods (ROHRLICH and BRÜCKNER, 1966).

RESULTS AND DISCUSSION

1. — *Changes in the content of organic matter in the soil of the continuous rye plot*

The maintenance of soil fertility under constant monoculture is of enormous interest and some data from this trial can give a picture of the situation with continuous rye crop- different fertilization systems (table 3).

TABLE 3

Continuous rye crop : content of organic matter in the soil
(Method Walkley-Black)

Treatment	Year		
	1964 (%)	1965 (%)	1974 (%)
No fertilization	1.90	1.85	1.70
Mineral fertilizer	2.00	2.18	1.70
Farmyard manure	2.70	2.6	2.40

The continuous supply of 20 tons of farmyard manure, which enriches the soil to about 2 500 kg/ha carbon had a very strong impact on the C-level of the non-fertilized standard plot. Unfortunately, no figures from the start of this experiment are available. Comparing the few results of Grossenzersdorf/Austria with the long term investigations in Halle/Germany, the differences do have the same dimensions. It is interesting to note that despite the high supply of farmyard manure in the german trial (12 tons/hectare/year), the C-level in the plot with farmyard manure fertilization did increase only by 0.44 p. 100 (1.24 p. 100 in 1878 compared with 1.68 in 1953). We cannot explain satisfactorily the decreasing tendency of the figures in table 3, but knowing that the degree of mineralization is influenced by so many variables, only a continuous checking of these values could justify any future attempt at further interpretation.

2. — *The grain yields in the crop rotation and the continuous rye crop*

a) *The effect of fertilization.*

The grain yield of the crops in the rotation and of the continuous rye are presented with their mean values in table 4 and figure 3.

When attempting a 3-factorial calculation of these yield data (effect of fertilization, cultivation system, year), the effect of the different fertilization treatments was found significantly above all the other factors involved ($P < 0.001$). In spring

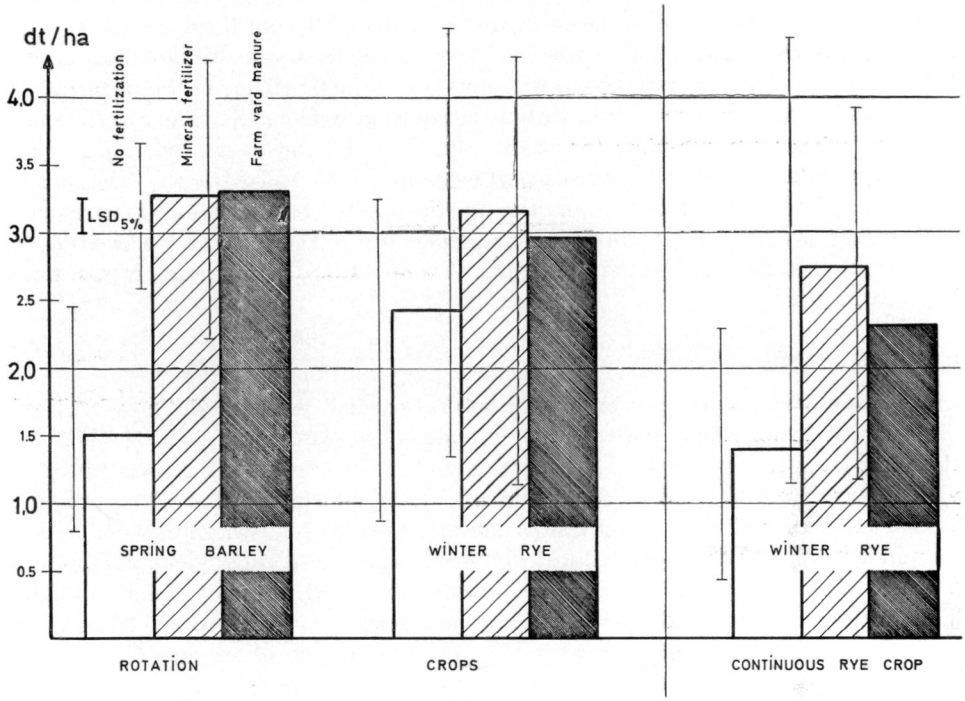


FIG. 3. — *Grain yields of crops under rotation and in continuous rye cropping with different fertilization treatments*

TABLE 4

Grain yields in the crop rotation (dt/ha, 1960-1975)

Treatment	Crop Spring barley		Rotation Winter rye		Monoculture Winter rye	
	dt/ha	rel.	dt/ha	rel.	dt/ha	rel.
No fertilization	14.98	(100)	24.25 (*100*)	(100)	13.89 (*57*)	(100)
Mineral fertilizer	32.96	(220)	31.74 (*100*)	(131)	27.74 (*87*)	(200)
Farmyard manure 20 tons/year	33.17	(221)	29.60 (*100*)	(122)	23.13 (*78*)	(167)

barley, an average yield of 14.98 dt/hectare in the non-fertilized sub-plots must be compared with the yield figure of 32.96 dt in the mineral-fertilized sub-plots and 33.17 dt in the sub-plots with the farmyard manure treatment (l.s.d. = 250 kg/ha). Herewith it could be shown that the yield level in the fertilized sub-plots was about twice as high as in the non-fertilized sub-plots. Less drastic effects of the fertilization were found in the winter rye crop within the rotation scheme. The yield of the non-fertilized winter rye sub-plots (24.25 dt) were only 31 and 22 p. 100 respectively below the yield level of the fertilized partner plots (31.74 and 29.60 dt). The longer vegetation time of the winter rye and the superior root system of this crop, compared with spring barley, can explain the reduced influence of the fertilization treatments compared with the unfertilized standards. A summarized comparison of the data is given in table 4.

b) *Effects of crop rotation.*

The positive influence of crop rotation on the yield levels of the non-fertilized plots can be demonstrated with the figures and the data presented. When comparing the yield level of winter rye in the rotation and under continuous monoculture, all yield figures from the last-named treatment are significantly lower ($P < 0.0001$). This is particular obvious when comparing the mean yields, where no fertilization was undertaken. Under monoculture, winter rye gave an average yield of 13.89 dt/hectare, wheras the yield level under the rotation was with 24.25 dt about 43 p. 100 higher. Also in the fertilized plots, the effect of fertilization could not completely correct the unfavourable effect of the mono-culture, but the differences are much lower than in the comparison mentioned before. With 31.74 dt grain yield per hectare from the mineral fertilizer treatment, the rye crop yielded on average 13 p. 100 more than under monoculture conditions (27.74 dt), the differences in the farmyard manure treatment were somewhat higher : with 29.60 dt of rye grains this yield was 22 p. 100 higher than in the monoculture, where grain yield was 23.13 dt.

From these comparisons described, a significant interaction ($P < 0.001$) between the effects of the fertilization and the cropping system could be calculated. Because of the complete lack of replications and the strong variation of the yield

TABLE 5

Yield comparisons between the Austrian long term continuous rye cropping and the German trial « Everlasting rye crop » in Halle

Treatments	Year location author	
	1960-1975 Grossenzersdorf/Austria	1879-1953 Halle/GDR Schmalfuss (1957)
No fertilization	100 = 13.89 dt/ha	100 = 19.5 dt/ha
Mineral fertilizer	199	179
Farmyard manure	166	177

levels in various years, further interactions such as fertilization — year or cropping systems — year cannot be calculated without great difficulties. It is quite obvious that these relationships did not change significantly during the last years and the results presented are valid permanently under the conditions described.

When comparing the yield relationships of the Austrian long term experiment and the results of the « Everlasting Rye Crop » in Germany, the following picture can be tentatively obtained (see table 5).

We find nearly the same relative yield differences between the non-fertilized treatment and manuring, despite the fact of a different overall yield level.

3. — *Results of the investigations of yield components in the continuous rye crop*

This long-term experiment with winter rye offered the possibility to investigate, together with the yield figures, the components forming these yields under so different fertilization treatments. According to the analysis of yield components after HEUSER (1928), the number of ears/m², grain numbers per ear and thousand kernel weights were evaluated (table 6).

TABLE 6

The effects of the fertilization on the yield components of the continuous rye crop
(4-years average)

Treatment	Number of ears per m²	Number of grains/ear	Thousand Kernel weight
No fertilization	273	23.3	27.1
Mineral fertilizer	384	31.7	28.7
Farmyard manure	405	30.3	27.3

Because of the significant interactions between trial years and fertilization effects the results are presented in graphs for each year (fig. 4 and fig. 5).

In regard to the numbers of ears per unit area it must be mentioned that in all 4 years (1970, 1972, 1973 and 1974) the non fertilized plots had only poorly tillering plants, thus reducing the number of ears significantly compared with the fertilizer-treated plots. Only about half of the sown kernels developed ear-bearing plants. Only in 1974, these figures were unusually high. The differences between the two other treatments in respect to this character were significant only in 1973.

During the growth and development of the plants, in all the years of observation the nutrients deficiencies in the non-fertilized plot were clearly visible and were the cause of significantly lower grain sets per ear under this treatment. At the most, these differences caused a 69 p. 100 higher grain number in the fertilized plots in 1973. The mineral fertilization increased the grain number per ear significantly above that of the farmyard manure treatment only in 2 out of 4 years. Interesting results

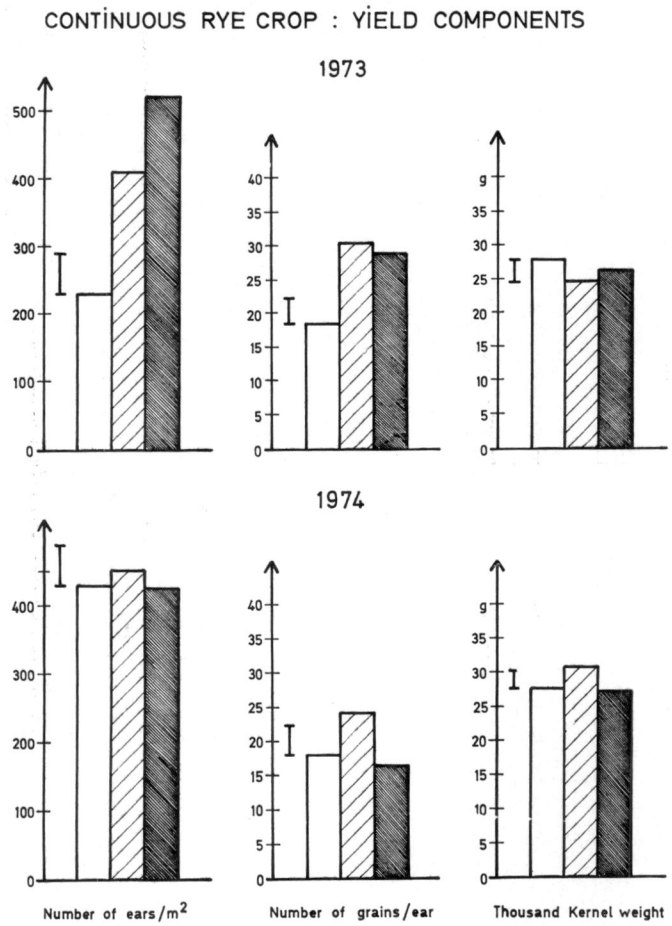


FIG. 5. — *Continuous rye cropping: yield components in 1973 and 1974 under different fertilization treatments*

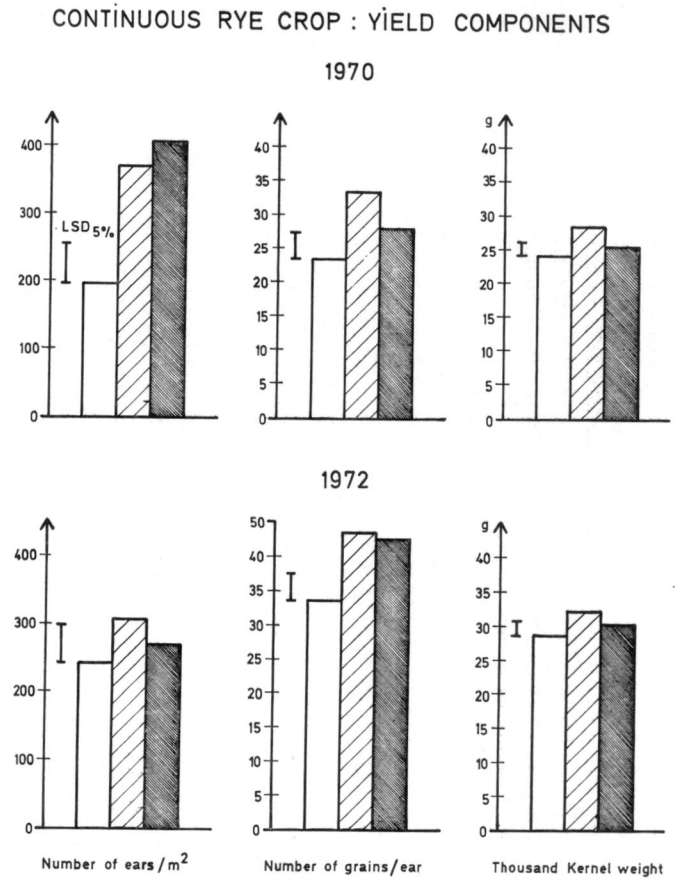


FIG. 4. — *Continuous rye cropping: yield components in 1970 and 1972 under different fertilization treatments*

could be observed in regard to the thousand kernel weights. Despite the very different treatments, only small differences could be found. This is a further proof for the genetically determined high stability of this character. The mathematical product of these 3 components involved did allow a further comparison with the yield figures given in table 4. With only a few deviations, it confirmed the results from the harvest of the whole plots.

4. — *The nutritional value of the rye grains*

a) *Protein contents and amino-acid patterns.*

The very different supply of plant nutrients in the plots of continuous rye caused some effects on the composition of the kernels. Depending on wheather conditions and different yield levels, the protein contents and the protein yields were different under the various fertilization treatment (table 7).

TABLE 7

Protein contents and protein yields of the continuous rye plots

Treatment/plot	Year	Protein p. 100 of d.m.		Protein yield kg/ha	
No fertilization	1970	9.52		42.8	
	1972	8.44		172.1	
	1973	7.35		110.2	
	1974	8.12		158.3	
∅ and rel. (%)		8.36	100	120.8	100
Mineral fertilizer	1970	9.69		212.2	
	1972	11.46		543.2	
	1973	8.15		352.1	
	1974	8.87		252.8	
∅ and rel. (%)		9.54	114	340.1	281
Farmyard manure	1970	9.01		181.1	
	1972	10.03		397.2	
	1973	8.35		320.6	
	1974	9.12		155.9	
∅ and rel. (%)		9.18	109	263.7	218

During the 4 years of testing, the grains derived from the plots where mineral fertilizers or farmyard manure was applied had an average protein content resp. 14 and 9 p. 100 higher than the grains from the non-fertilized plots. The different yield levels influenced of course protein amount per unit area. In the fertilized plots, a resp. nearly threefold and doubled protein yield was achieved compared with the yield of the non-fertilized plots. This significant increase in the nutritional quality can be referred to a balanced supply of nitrogen and potassium (STEINECK, 1974).

The question whether the differences in the protein contents had an effect also on the amino-acid pattern of the proteins involved was tested in a separate analysis (fig. 6).

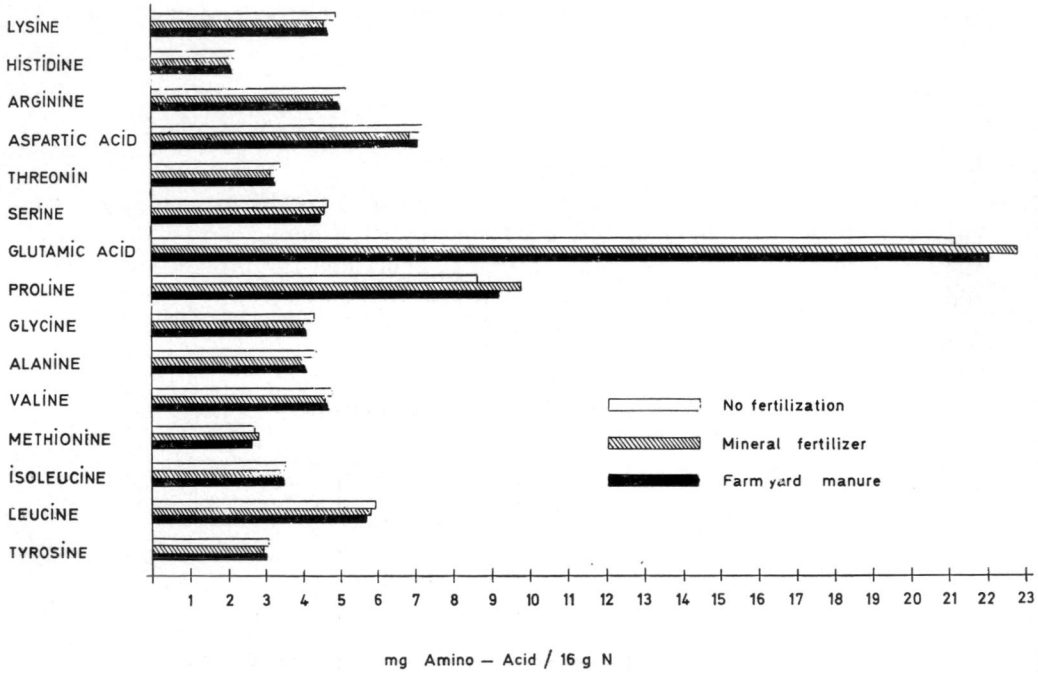


FIG. 6. — *Continuous rye cropping: average amino-acid patterns of rye grains under different fertilization treatments*

The proportions of the 15 amino-acids of the rye protein analysed were in general not significantly influenced by the different treatments. Only in the fractions glutamic acid and proline the levels were slightly influenced by the mineral and the farmyard manure fertilization.

b) *Mineral contents of the grains.*

The results of the investigation of the mineral content of the grains derived from different fertilization treatments are presented in table 8.

As it was mentioned in the previous chapter, differences in the nitrogen content could be found. The nitrogen content of grains harvested from the plots with mineral fertilization was about 15 p. 100 higher than that from the non-fertilized plot. The difference in nitrogen content between the grains from the unfertilized plot and the plot with farmyard manure treatment was 10 p. 100 only. The contents in the other minerals, presented in this table, did not demonstrate any differences between the various treatments involved. The amount of phosphorus and potassium applied as fertilizers could not increase the level of mineral contents in the grains produced under these treatments, compared with those coming from the non-fertilized plots. Similar effects could be observed with calcium and magnesia. These results show a

pronounced constancy of the content of main nutrients. Even vastly different nutrient supplies during a period lasting nearly 70 years could not change significantly the mineral content of the rye kernels. The development and formation of a normal rye kernel is therefore guaranteed even under very limiting conditions.

TABLE 8

Mineral contents of the rye grains of the continuous rye plots

Treatment	Year	N	P	K	Ca	Mg	Yield dt/ha
No fertilization	1970	1.67	0.305	0.529	0.050	0.117	4.5
	1972	1.48	0.353	0.553	0.054	0.112	20.4
	1973	1.29	0.351	0.601	0.046	0.110	15.0
	1974	1.30	0.347	0.455	0.041	0.103	19.5
Mineral fertilizer	1970	1.70	0.342	0.543	0.047	0.116	21.9
	1972	2.01	0.376	0.552	0.050	0.117	47.4
	1973	1.43	0.326	0.646	0.044	0.113	43.2
	1974	1.42	0.333	0.410	0.053	0.119	28.5
Farmyard manure	1970	1.58	0.378	0.582	0.054	0.131	20.1
	1972	1.76	0.391	0.550	0.049	0.115	39.6
	1973	1.50	0.345	0.655	0.045	0.116	37.5
	1974	1.46	0.361	0.441	0.061	0.121	17.1

These facts are also very clearly demonstrated by the thousand kernel weights, which are nearly constant under all our experimental conditions. Under limiting nutrient conditions, the rye plant reacts first with a reduced tiller growth, then with a reduction of the number of grains/ear. The grain as the reproductive part of the plant is not subject to drastic changes and has always a fairly equal amount of mineral and organic substances.

c) *The vitamin content of the rye grains.*

Rye bread can play an important role for the supply of vitamins of the B-complex in human nutrition. Grains samples from the harvest of a top yielding year (1973) were therefore analysed for their vitamin contents (table 9).

There are no clearly defined differences in regard to the various fertilizer treatments, but it seems that the better supply of plant nutrients by mineral fertilization has an effect on the content of vitamin B_1 and Pantothenic acid. These single analyses did not allow a further interpretation of any influences by different fertilization treatments. Further and more detailed investigations are undertaken to achieve a clear picture of the relationship between fertilization and vitamin content.

d) *Baking quality of the rye grains.*

During these investigations about quality, some tests of the dough and baking qualities were performed to find out possible influences of the kind of fertilization on these important processing characters. Grain samples of the continuous rye trial were

stored 3 weeks at a constant temperature of 15°C and milled to a 50 p. 100 milling degree. The flours were stored for 8 days and then various tests were undertaken on standard doughs, such as amylographic values, water-uptake, swelling ability and gelatination of the starch. Finally a standard baking test was carried out.

TABLE 9

Vitamin contents of the rye flours (mg/kg d.m.), *derived from differently fertilized rye* (harvest 1973)

Treatment	Vitamin B_1	Vitamin B_2	Pantho-thenic A	Nicotinic Acid
No fertilization	6.50	2.3	12.2	11.6
Mineral fertilizer	7.20	2.1	14.4	10.6
Farmyard manure ...	5.70	1.9	11.1	9.7

— Dough sample 1, no fertilization :

The values for water uptake and the swelling ability are below average, the amylographic values were found to be extremely high. With standard dough procedures and dough acidity a very dry crumb characteristic of the bread was expected. The following baking test (dough rest 45 minutes, dough temperature 26°C, development time 50 minutes, baking time 58 min. with 250-190°C) confirmed these expectations. The bread had to be classified as unsuitable for commercial purposes.

— Dough sample 2, mineral fertilization :

In this sample, all dough characteristics were in an average range, the bread was somewhat better in quality than the bred from the first sample, only the structure of the crumb did not completely meet the quality standards.

— Dough sample 3, farmyard manure :

Here the water uptake and the swelling ability of the dough was slightly better than in sample 2, but the maximum value of the gelatination of the starch was found extremely high and affected negatively the quality of the bread.

The qualities of the breads from these 3 samples were finally classified : First rank was given to sample 2 (derived from mineral fertilization treatments), followed by sample 3 (farmyard manure) and sample 1 (no fertilization).

These results are an indication that the mineral fertilization of the plant has no unfavourable effects on the nutrition value of the grains used in human consumption. Despite the different fertilization treatments, nearly equal quality levels of the grains and their products were found.

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

RÉSULTATS D'UN ESSAI DE ROTATION ET DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE (70 ANS) DANS LA PRINCIPALE RÉGION DE PRODUCTION CÉRÉALIÈRE DE L'AUTRICHE

Cette étude présente les résultats obtenus au cours d'un essai de rotation et de fertilisation de longue durée à Grossenzersdorf/Autriche ; le dispositif a été mis en place en 1906 et maintenu sous sa forme initiale, avec les mêmes traitements jusqu'à maintenant. Eu égard aux objectifs initiaux de cet essai on a pu obtenir les résultats et les conclusions qui suivent :

1° La culture continue du seigle entraîne des chutes de rendement qui ne peuvent être réduites par des apports d'engrais minéraux ou de fumier de ferme.

2° Les effets des trois traitements différents (pas de fertilisation, apport d'engrais minéraux, application de fumier de ferme) sur les niveaux du rendement ont été plus prononcés chez l'orge de printemps que chez le seigle d'hiver. D'après les observations à long terme, le rendement des parcelles fertilisées avec des engrais minéraux a été plus élevé dans tous les cas que celui obtenu avec les deux autres traitements.

3° Les apports d'engrais minéraux ou de fumier ont augmenté significativement les composantes du rendement : nombre d'épis/m² et nombre de grains/épis ; par contre, le poids de mille grains est resté à un niveau presque constant.

4° La qualité des grains de seigle, testée d'après les caractéristiques suivantes : teneur en protéines, composition en acides aminés, teneur en vitamines et qualités boulangères ne présentait pas de différences très sensibles, quel que soit le traitement envisagé.

Par rapport à l'application de fumier de ferme et à l'absence de fertilisation, l'utilisation exclusive d'engrais minéraux n'a pas eu d'effet désavantageux sur la fertilité du sol, le niveau des rendements et sur les qualités nutritionnelles et technologiques des grains de seigle.

ZUSAMMENFASSUNG

ERGEBNISSE EINES 70-JÄHRIGEN DAUERDÜNGUNGS- UND FRUCHTFOLGEVERSUCHS IM ÖSTERREICHISCHEN HAUPTGETREIDEBAUGEBIET

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse eines langjährigen Fruchtfolge-und Dauerdüngungsversuchs in Grossenzersdorf/Österreich dargestellt, der im Jahre 1906 angelegt wurde und bis zum heutigen Tag mit den gleichen Behandlungen weitergeführt wird. Im Hinblick auf die Fragestellung des Versuchs konnten aus den erzielten Ergebnissen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden :

1° Kontinuierlicher Roggenbau führte zu Ertragsdepressionen, die durch Mineral- oder Wirtschaftsdünger nicht verringert werden konnten.

2° Der Einfluss der 3 verschiedenen Düngungsmethoden (ungedüngt, Mineraldüngung und Stallmistdüngung) auf das Ertragsniveau war bei Sommergeste ungleich stärker ausgeprägt als bei Winterroggen. Langjährig gesehen, waren die Erträge der mineralgedüngten Parzellen immer etwas höher als in den beiden Vergleichsparzellen.

3° Die Düngung mit Mineraldünger und Stallmist erhöhte signifikant die Ertragskomponenten Ährenzahl/m² und Kornzahl/Ähre, hatte aber auf die Höhe des Tausendkorngewichts nur einen geringen Einfluss.

4° Die Qualität der Roggenkörner, die auf Grund von Untersuchungen über den Eiweissgehalt, die Aminosäurezusammensetzung, die Vitamingehalte und die Backfähigkeit beurteilt werden konnte, wurde durch die unterschiedlichen Behandlungen nur unwesentlich beeinflusst.

Die ausschliessliche Anwendung von Mineraldüngern übte keine nachteiligen Wirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit sowie auf das Ertragsniveau, den Nährwert und die Verarbeitungsqualität des Winterroggens aus, verglichen mit den beiden anderen Methoden, ungedüngt und Stallmistdüngung.

РЕЗЮМЕ

Результаты долгосрочного (70 лет) опыта удобрения в севооборотах главного района продукции злаков в Австрии.

О. ШТЕЙНЕК, П. РЮККЕНБАУЕР.

В данной работе представлены результаты долгосрочного опыта применения удобрений в севооборотах, проведенного в Гроссенцерсдорфе (Австрия). Опыт был начат в 1906-м году и поддерживался в своей начальной форме, с одними и теми-же обработками, до настоящего времени. Принимая во внимание первичные цели этого опыта, полученные результаты позволили вывести следующие заключения :

1. Монокультура ржи вызывает падение урожайности, которое не могут остановить ни внесение минеральных удобрений, ни внесение навоза;
2. Различные примененные обработки (без удобрений, минеральное удобрение, навоз) влияют больше на уровень урожайности в случае культуры весеннего ячменя, чем в случае культуры озимой ржи. Если судить по результатам длительных наблюдений, урожайность была всегда лучше и выше на делянках обработанных минеральными удобрениями, чем на делянках других вариантов (без удобрения, удобрение навозом).
3. Внесение минеральных удобрений или навоза, позволило получить показательные увеличения числа колосов на м^2, и числа зерен в колосе. И, напротив, вес 1 000 зерен оставался во всех случаях на одном уровне.
4. Качество зерна ржи, определенное с помощью следующих показателей : содержание протеинов, амино-кислотный состав, содержание витаминов, хлебопекарные качества, — было всегда почти одинаковым и не зависело от примененной обработки.

По сравнению с вариантами без удобрений, или удобрения навозом, исключительное применение минерального удобрения не имело отрицательного влияния на плодородие почвы, уровень урожайности и питательные и технологические качества зерна ржи.

REFERENCES

HEUSER W., 1928. Untersuchungen über die Bestandesdichte des Getreides in ihrer Bedeutung als Ertragskomponente und als Sortenmerkmal. *Pflanzenbau*, Berlin, 305.

KÖPPEN W., GEIGER R., 1961. *Die Klimazonen der Erde.* J. Perthes Verlag, Darmstadt.

MÜLLER W., 1971. Agrarmeteorologische Untersuchungen des Wärme — und Wasserhaushaltes im Bereich landwirtschaftlicher Kulturen. II. Komponenten des Wasserhaushaltes. *Arch. Met. Geoph. Biokl.* Ser. B, **19**, 199-224.

ROHRLICH M., BRÜCKNER G., 1966. Das Getreide. Band 4. *Das Getreide und seine Verarbeitung.* Parey Verlag, Berlin.

SCHMALFUSZ K., 1957. Der Feldversuch « Ewiger Roggenbau » in Halle. *Die Phosphorsäure*, **17**, 133-143.

SIMOVA O., 1972. Amino-acid composition of proteins in the Czechoslovak varieties of cereal crops. *Rostlinná výroba* (Praha), **18** (10), 1019-1039.

STEINECK O., 1974. The relation between potassium and nitrogen in the production of plant material. *Proc. 10th Congr. Intern. Potash Inst.*, Budapest, 189-196.

STEINHAUSER F., ECKEL O., SAUBERER F., 1955. Klima und Bioklima von Wien I. Zentralanstalt f. Meteorologie und Geodynamik, Wien.

WALTER H., 1970. *Vegetationszonen und Klima.* Ulmer Verlag, Stuttgart.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 819-836.

INTERVENTION

ASPECTS BOTANIQUES ET ANALYTIQUES DE L'ÉVOLUTION A LONGUE ÉCHÉANCE DE L'ÉTAT NUTRITIF DU SOL (1)

T. BEHAEGHE et A. COTTENIE

Faculté des Sciences agronomiques
Université de Gand
Belgique

RÉSUMÉ

Des fumures unilatérales répétées durant 36 années sur herbage permanent présentent des effets quantitatifs et qualitatifs très prononcés. Quantitativement, l'importance hiérarchique des éléments fut la suivante :

K > P > N > Ca > Mg.

Une évolution floristique spécifique mène à la disparition de certaines espèces et à l'accroissement de certaines autres. Cela se reflète nettement sur la composition chimique minérale de l'herbage récolté et — en combinaison avec les rendements — sur les exportations d'éléments nutritifs. La conséquence de ces exportations consiste en un épuisement du sol à des degrés différents, que l'analyse chimique du sol confirme de façon fidèle.

L'évolution du pH du milieu fournit aussi une explication concernant la dynamique de certains éléments.

I. — INTRODUCTION

En 1939 un essai de longue durée fut aménagé dans le but d'étudier l'effet de fumures unilatérales sur la productivité et la composition botanique et chimique d'un herbage permanent. Cette communication résume les principales observations et la situation atteinte en 1975-1976.

(1) Recherches réalisées avec l'aide de l'I.R.S.I.A. (Institut pour l'encouragement de la Recherche scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture, Bruxelles).

TABLEAU I

Fumures appliquées
(doses moyennes en unités par ha)

Années	N		P_2O_5		K_2O		CaO comme			MgO	
	Dose	Forme	Dose	Forme	Dose	Forme	Chaux	Élément secondaire	Total	Dose	Forme
1939-1957	50	$(NH_4)_2SO_4$	90	super 18	120	KCl 40	150	135	284	60	chaux magnésienne
1948-1957	133	NH_4NO_3	133	super 18 ou scories 18	150	KCl 40	150	344	494	60	carbonate de Ca et Mg
1958-1961	220	NH_4NO_3	180	super 18 ou fertiphos 38	160	KCl 40	150	435	585	60	carbonate de Ca et Mg
1962	315	NH_4NO_3	150	super triple 43	400	KCl 40	0	385	385	—	—
1963-1965	307	urée 45	140	super triple 43	400	KCl 40	252	70	322	30	carbonate de Ca et Mg
1966-1967	300	NH_4NO_3 (33)	150	super triple 40	400	K_2SO_4 50	457	80	537	100	kiesérite
1968-1970	300	NH_4NO_3 (33)	150	super triple 40	500	K_2SO_4 50	563	80	643	60	kiesérite
1971-1975	0 sur PKCa 150 sur NPCa 200 sur NKCa 300 sur NPK NPKCa NPKCaMg		150 super triple 40		0 sur NPCa 240 sur NKCa 350 sur PKCa NPK 400 sur NPKCa NPKCaMg		367	80	447	70	kiesérite

II. — MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

L'essai se situe à la ferme expérimentale de l'Université de l'État de Gand (Belgique) sur un sol sablo-limoneux lourd et un sous-sol argileux à partir de 60 cm de profondeur. La couche arable contient 34 p. 100 de sable (> 50 μ), 54 p. 100 de limon (2-50 μ) et 12 p. 100 d'argile (0-2 μ).

Les traitements unilatéraux répétés annuellement sont : NPKCaMg, NPKCa, NPK, -PKCa, N-KCa, NP-Ca et un témoin sans fumure (O).

L'essai comprend trois répétitions et chaque parcelle a une surface nette de 40 m².

Le gazon existant depuis 1939 fut retourné et réensemencé en 1948 avec le mélange suivant (kg/ha) :

	kg/ha
Lolium perenne	25
Festuca pratensis	10
Poa pratensis	5
Trifolium repens	5
Lolium multiflorum	4
Total	49

Le tableau 1 donne les fumures annuelles.

III. — RÉSULTATS ET OBSERVATIONS

III. 1. — *Production de matière sèche*

La figure 1 représente l'évolution de la production relative de matière sèche. On remarque que l'omission de phosphates se manifesta seulement à partir de 1961

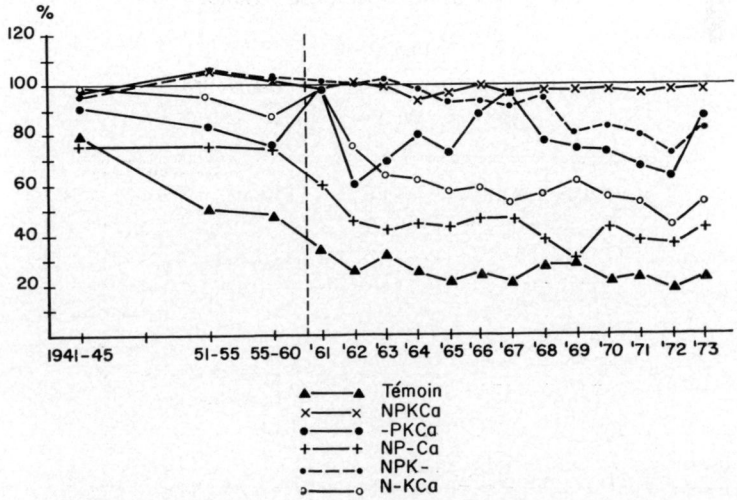


FIG. 1. — *Rendements relatifs* (NPKCaMg = 100 p. 100)

par une diminution significative de la production, indiquant une réserve de P dans le sol non négligeable. D'autre part la réaction vis-à-vis du potassium fut immédiate.

Le traitement PKCa sans azote manifeste les plus grandes variations de la production relative.

Les productions moyennes de la période 1966-1975 exprimées en kg de matière sèche/ha/an, ainsi que les erreurs standards et les différences significatives au niveau de 5 p. 100 d'après DUNCAN sont comme suit :

Traitement	Kg de MS/ha/an	Déviation standard $s_{\bar{x}}$	Test DUNCAN
NPKCaMg	11 155	383	*f*
NPKCa	10 965	383	*f*
NPK	9 504	322	*e*
PKCa	8 414	405	*d*
NKCa	5 878	252	*c*
NPCa	4 523	193	*b*
O	2 505	168	*a*

Le manque de N, P, K ou Ca se manifeste de façon significative et prononcée, tandis que l'absence d'une fumure magnésienne n'entraîne pas encore de différences significatives.

Remarquons que le traitement NPK reçut jusqu'en 1962 les fumures azotées et phosphatées sous forme d'engrais contenant le Ca comme élément secondaire. Cela suffit pour maintenir le pH à une valeur encore suffisante pour permettre d'y obtenir un rendement égal à celui du traitement NPKCa. A partir de 1963, les engrais appliqués sur les parcelles NPK furent pratiquement exempts de Ca, ce qui amène une diminution significative de pH et de production.

III. 2. — *Composition floristique*

TABLEAU 2

Composition floristique en p. 100, janvier 1976
(Méthode De Vries, 1933)

	NPKCaMg	NPKCa	NPK	-PKCa	N-KCa	NP-Ca	O
Lolium perenne	54	50	39	36	23	2	17
Dactylis glomerata	1	—	1	—	—	—	—
Poa pratensis	8	4	50	4	14	35	4
Poa trivialis	26	36	—	34	2	3	5
Agrostis tenuis	1	—	7	1	53	52	31
Festuca rubra	—	—	—	—	1	6	1
Holcus lanatus	—	—	1	—	5	1	6
Trifolium repens	9	8	2	22	—	—	16
Herbes	—	—	—	3	2	2	18

La composition floristique actuelle, exprimée en pour cent est reprise au tableau 2. De même qu'en ce qui concerne la production de matière sèche, le Mg n'exerce pas encore une influence notable. D'autre part l'omission des éléments N, P, K ou Ca entraîne une évolution floristique tout à fait spécifique, dont les aspects principaux sont résumés au tableau 3.

Une évolution remarquable dans le temps fut observée sur les parcelles sans fumure phosphatée : à partir de 1960, on y constate un développement prononcé de dicotylédones, disparaissant progressivement au cours des années suivantes.

TABLEAU 3

Effets des carences sur la composition botanique

Carence	Espèces disparaissantes	Espèces en progrès
N		*Trifolium repens, Poa trivialis, Bellis perennis.*
K	*Lolium perenne, Dactylis glomerata, Trifolium repens, Poa trivialis.*	*Festuca rubra, Agrostis tenuis, Poa pratensis, Cerastium arvense.*
P 1er stade		*Taraxacum officinalis, Leontodon autumnalis, Bellis perennis.*
P épuisement	*Poa trivialis, Trifolium repens.*	*Agrostis tenuis, Festuca rubra, Cerastium arvense.*
Générale (témoin)	*Dactylis glomerata.*	*Agrostis tenuis, Trifolium repens, Holcus lanatus, Anthoxantum odoratum, Brunella vulgaris, Bellis perennis, Luzula campestris, Leotodon autumnalis, Cerastium arvense, Hypochaeris radicata.*
pH bas	*Poa trivialis.*	*Dactylis glomerata, Poa pratensis, Agrostis tenuis.*

III. 3. — *Composition minérale des plantes*

Les teneurs moyennes observées en 1975 montrent à quel point la fumure peut influencer la composition minérale d'un herbage.

Les différences importantes illustrées au tableau 4 sont la résultante de l'évolution floristique et de l'effet des traitements sur la composition de chaque espèce.

TABLEAU 4

Teneurs en éléments minéraux de la matière sèche végétale (1975)

Traitement	méq./100 g				mg/100 g			mg/kg			
	Ca	Mg	K	Na	N	P_2O_5	Cl	Fe	Mn	Zn	Cu
NPKCaMg	29,12	18,58	66,00	8,18	2 548	930	598	178	45,6	31,4	6,0
NPKCa	34,25	10,44	66,50	7,58	2 778	930	606	197	55,0	27,9	5,0
NPK	16,75	9,21	70,50	4,88	2 917	870	505	162	142,0	37,4	4,5
PKCa	49,50	11,68	81,00	3,63	2 900	1 060	707	303	51,5	26,7	5,5
NKCa	20,62	7,79	65,00	1,52	2 778	380	738	217	62,5	31,7	7,0
NPCa	35,25	15,13	19,00	14,10	2 674	1 000	615	163	58,0	31,4	5,0
O	31,37	16,36	32,50	17,75	2 464	510	656	178	492,0	41,4	6,0

Pour chaque élément plusieurs différences significatives se manifestent et se résument dans les points suivants :

a) *L'omission unilatérale* de P, K et Ca donne l'herbage le plus pauvre en chacun de ces éléments. L'absence de fumure phosphatée va de pair avec des teneurs basses de Ca, Mg et Na.

D'autre part les parcelles sans fumure azotée produisent une récolte riche en N et Cl et la plus riche en P, K et Ca. Cela est un effet indirect de la richesse en trèfles des parcelles -PKCa.

b) *Des antagonismes ioniques* se manifestent nettement comme suit :

— teneur élevée en Na, Ca et Mg sur les parcelles sans K,
— teneur élevée en Cl^- sur les parcelles sans P_2O_5,
— teneur plus élevée en K sur les parcelles sans Ca et Mg,
— teneur plus élevée en Ca sur les parcelles comparables sans Mg et vice versa.

c) *Les parcelles n'ayant plus reçu aucune fumure* produisent un herbage généralement plus riche en éléments minéraux que celles recevant des fumures unilatérales ; la teneur en Na y est même la plus élevée. Cela s'explique par une dilution moins grande, suite à la production très basse de ces parcelles témoin.

d) *Parmi les éléments traces, le Mn et le Zn ont un comportement comparable et montrent les plus grandes variations :*

— teneurs les plus élevées sur les parcelles témoins,
— teneurs élevées sur les parcelles NPK, sans Ca,
— teneurs plus basses sur les parcelles avec Ca.

L'évolution du pH des sols, ainsi que l'épuisement progressif au cours des années, sont les facteurs responsables de cette situation.

Les variations du Fe et du Cu sont moins en rapport avec le pH.

e) *L'exportation totale* d'éléments minéraux par les récoltes reflète l'effet combiné des teneurs et des rendements en matière sèche.

Le tableau 5 en donne les valeurs moyennes de 1967 à 1971. La production

TABLEAU 5

Exportation de matière sèche et d'éléments minéraux
Moyennes annuelles en kg/ha (± : probabilité 95 p. 100)

Traitement	Moyenne 1967-1971	Éléments minéraux Moyennes pour 1967-1971 + 1975					Matière sèche
	N	P	Ca	Mg	K	Na	
NPKCaMg	276 ± 29	*49,3* ± 6,0	62 ± 5	*22,4* ± *2,6*	*325* ± 46	17 ± 3	*10 750* ± 600
NPKCa ..	274 ± 26	48,9 ± 5,2	69 ± 7	13,4 ± 0,9	322 ± 41	*18* ± 4	10 570 ± 640
NPK	271 ± 20	37,4 ± 3,6	35 ± 9	10,7 ± 1,2	287 ± 30	15 ± 4	9 260 ± 720
-PKCa....	*280* ± *52*	38,8 ± *7,0*	*87* ± *28*	11,6 ± *2,6*	275 ± *51*	9 ± *5*	8 030 ± *1 290*
N-KCa ...	205 ± 33	10,4 ± 1,9	29 ± 7	*6,4* ± 1,4	191 ± 43	*4* ± 2	5 920 ± 730
NP-Ca ...	161 ± 26	21,4 ± 3,3	41 ± 8	10,6 ± 2,4	*23* ± 6	16 ± 3	4 280 ± 520
O	*74* ± 21	*6,6* ± 1,7	*24* ± 7	6,6 ± 1,7	36 ± 10	14 ± 4	2 620 ± 520

maximale, obtenue sur les parcelles à fumure complète (NPKCaMg et NPKCa) va de pair avec une exportation maximale de P, K et Mg. Par contre, les parcelles sans fumure azotée (-PKCa) ont exporté les plus grandes quantités de N et de Ca, cela grâce à leur richesse en trèfles. Les très grandes différences observées doivent résulter dans une évolution spécifique de l'état nutritif des parcelles individuelles suivant les traitements.

III. 4. — *Évolution de l'état nutritif du sol* (tabl. 6)

III. 41. — *Évolution du pH.*

Le pH des deux parcelles sans traitement Ca s'est stabilisé à une valeur basse et l'épuisement cationique des parcelles NPK est même plus prononcé que celui des parcelles témoin.

Pour la période de 1963 à 1975, un calcul de régression a montré qu'une quantité annuelle de 610 kg $CaCO_3$ (50 p. 100) par ha serait nécessaire pour maintenir le pH des autres parcelles à la valeur existante.

TABLEAU 6

Caractéristiques des sols : valeurs atteintes en 1975
(Extraction avec : NH_4 acétate 0,5 N + 0,02 M EDTA (pH 4,65))

Traitement	pH H_2O	pH KCl	méq./100 g				mg/100 g P_2O_5	mg/kg			
			Ca	Mg	K	Na		Fe	Mn	Zn	Cu
NPKCaMg .	6,77	5,98	10,83	1,02	0,21	0,05	26,83	299	34,0	4,78	1,68
NPKCa	6,71	5,92	12,71	0,15	0,21	0,06	26,00	278	48,7	3,97	1,72
NPK.....	4,79	3,61	2,65	0,26	0,35	0,03	29,17	304	29,2	4,96	1,15
PKCa	6,75	6,03	12,21	0,19	0,43	0,05	33,25	272	37,2	4,62	1,45
NKCa	6,92	6,13	10,50	0,21	0,48	0,04	3,75	314	38,6	2,95	2,62
NPCa	6,83	6,15	12,37	0,15	0,07	0,05	39,50	305	37,4	4,95	1,68
O	5,27	3,95	5,25	0,43	0,10	0,10	3,58	398	38,9	4,40	1,67

III. 42. — *Éléments majeurs.*

L'analyse chimique du sol fut effectuée par extraction avec le 0,5 N NH_4- acétate + 0,02 M EDTA à pH 4,65. Cela fournit des valeurs à interpréter suivant le tableau 7.

La situation atteinte en 1975 se caractérise comme suit :

Calcium.

Toutes les parcelles ayant reçu périodiquement de la chaux ont un niveau calcique élevé. Par rapport à ceux-ci, les parcelles témoin sans fumure se situent à ± 50 p. 100 et celles avec traitement NPK (sans Ca) à ± 20 p. 100. Cela confirme un épuisement calcique plus prononcé des parcelles NPK où les exportations furent plus importants que sur les témoins.

TABLEAU 7

État nutritif chimique des sols belges
(Extraction avec 0,5N $NH_4Ac.$ + 0,02 M EDTA (pH 4,65))
Rapport d'extraction 1/5

Texture	C.E.C. (méq./100 g)	Niveau	méq./100 g			
			Ca	Mg	K	Na
Moyenne	15	très élevé	> 12	> 1,2	> 0,60	> 0,20
		élevé	8-12	0,8 -1,2	0,40-0,60	0,15-0,20
		moyen	5-8	0,5 -0,8	0,20-0,40	0,10-0,15
		bas	2,5-5	0,25-0,5	0,10-0,20	0,05-0,10
		très bas	< 2,5	< 0,25	< 0,10	< 0,05

Texture	C.E.C. (méq./100 g)	Niveau	mg/100 g				
			CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5
Moyenne	15	très élevé	> 336	> 24	> 28	> 6	> 40
		élevé	224-336	16-24	19-28	4,5-6	20-40
		moyen	140-224	10-16	10-19	3 -4,5	12-20
		bas	70-140	5-10	5-10	1,5-3	6-12
		très bas	< 70	< 5	< 5	< 1,5	< 6

Magnésium.

De même que dans le cas du Ca, trois niveaux de Mg se manifestent en fonction des traitements :

— niveau élevé sur les parcelles ayant reçu du Mg ;

— niveau moyen sur les parcelles témoin où la production de matière sèche et l'exportation de Mg sont restées faibles ;

— niveau bas sur toutes les autres parcelles où les niveaux atteints se distinguent d'après les exportations.

Potassium.

Les parcelles n'ayant pas reçu du potassium ont atteint un stade d'épuisement prononcé. Les autres parcelles montrent encore entre elles des variations du simple au double et les teneurs observées sont inversement proportionnelles à la productivité. Cela veut dire que les traitements unilatéraux sans azote et sans phosphore ont laissé plus de potassium dans le sol que les traitements plus complets.

Phosphore.

Les deux parcelles n'ayant plus reçu de fumure phosphatée ont évolué vers un niveau de P_2O_5 très bas. Les teneurs des autres sont environ 10 fois plus élevées, mais reflètent aussi l'effet des exportations. Ainsi les parcelles avec fumure unilatérale, sans azote et sans potasse, ont conservé une teneur en P_2O_5 plus élevée que celles avec fumure complète.

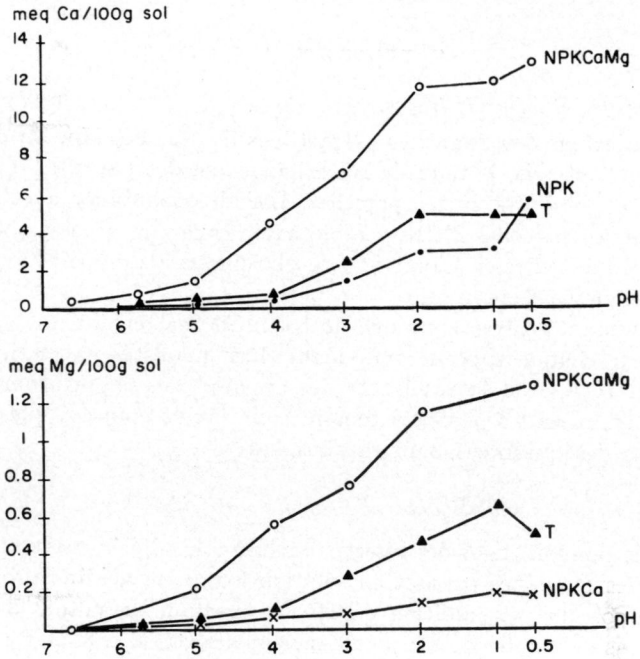


FIG. 2. — *Ca et Mg mobilisables*

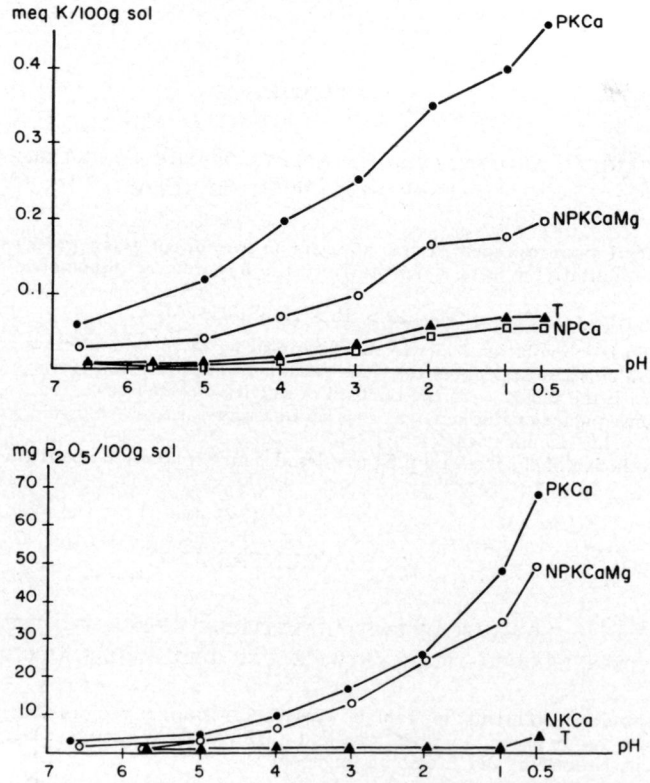


FIG. 3. — *K et P_2O_5 mobilisables*

Sodium, fer et éléments traces.

Les variations des quantités extractibles de Na, Fe, Mn, Zn et Cu sont moins prononcées. Toutefois, le taux de Na échangeable des parcelles témoin est environ le double de celui des autres parcelles. L'acidité combinée avec les exportations réalisées sur les parcelles NPK, semble avoir causé un abaissement significatif du niveau de Mn de celles-ci. L'omission de phosphates va de pair avec une diminution des réserves en Zn dans le sol.

En résumé, l'analyse chimique du sol révèle nettement une évolution caractéristique pour chaque type de traitement. Les quantités extractibles des éléments nutritifs en 1976, sont la résultante des apports, des exportations par les récoltes et des pertes. Ainsi les parcelles témoin sont moins épuisées que celles soumises à des fumures déséquilibrées, sauf en phosphate.

III. 43. — *Réserves mobilisables d'éléments nutritifs.*

Afin de pouvoir juger des réserves mobilisables d'éléments nutritifs, nous avons déterminé les quantités passant en solution lorsqu'on acidifie progressivement une suspension sol-eau par addition de HNO_3. Quelques résultats de tels essais sont montrés dans les figures 2 et 3 pour les éléments Ca, Mg, K et P_2O_5. Ils confirment les observations basées sur les analyses courantes (§ III. 42.) et illustrent la dynamique des fractions mobilisables d'éléments.

SUMMARY

BOTANICAL AND ANALYTICAL ASPECTS OF THE LONG-TERM EVOLUTION OF SOIL NUTRITIVE STATE

Unilateral manures repeated over 36 years on permanent grass present very marked quantitative and qualitative effects, Quantitatively the hierarchical importance of the elements was the following :

$$K > P > N > Ca > Mg$$

A specific floristic evolution leads to the disappearing of certain species and to the increase of some others. This also appears in the chemical mineral composition of the grass harvested and — combined with the yields — in the removal of nutritive elements.

The consequence of this removal consists in a more or less exhausted soil what is accurately confirmed by the chemical analysis of soil.

The evolution of the medium pH provides also an explanation about the dynamics of certain elements.

ZUSAMMENFASSUNG

BOTANISCHE UND ANALYTISCHE GESICHTSPUNKTE DER LANGFRISTIGEN ENTWICKLUNG DES BODENNÄHRZUSTANDS

Die einseitige während 36 Jahren wiederholte Düngung eines dauerseitigen Grasslands führt zu sehr ausgeprägten quantitativen und qualitativen Wirkungen. Der Menge nach war die hierarchische Bedeutung der Elemente folgendes :

$$K > P > N > Ca > Mg$$

Eine spezifische Floraentwicklung bewirkt das Verschwinden gewisser Arten und die Zunahme anderer. Dies zeigt sich deutlich in der chemischen Mineral zusammensetzung der geernten Kraüter und — in Verbindung mit den Erträgen — in der Entnahmme von Nährelementen.

Die Folge dieser Entnahme ist eine mehr oder weniger geprägten Bodenerschöpfung, welche die chemische Analyse des Bodens genau bestätigt.

Die Entwicklung des Boder-pH liefert auch eine Erklärung für die Dynamik gewisser Elemente.

РЕЗЮМЕ

Ботанический и аналитический аспекты долгосрочной эволюции питательного состояния почвы.

Т. БЕХЕГ, А. КОТТЕНЬЕ.

Одностороннее удобречие постоянного луга, проводившееся в течении 36-ти лет, производит сильное действие, как в качественном, так и в количественном отношении. В количественном смысле иерархический порядок расположения элементов следующий : K > P > N > Ca > Mg.

Специфическая эволюция флоры приводит к исчезновению некоторых видов, и к увеличению численности некоторых других. Это очень ясно отражается на химическом минеральном составе собранных трав, и, в комбинации с урожайностью, — на выносе питательных элементов. Следствием вынесенных количеств является разная степень истощения почвы, подтверждающаяся химическим ее анализом.

Эволюция pH среды позволяет также об' яснить динамику некоторых из элементов.

DISCUSSION GÉNÉRALE — GENERAL DISCUSSION

P. PÉLEGRIN.

Question générale : Désire savoir si parmi l'assistance on peut avoir des informations sur les champs d'essais de moyenne durée (⩾ 15 ans) en pays tropical ou subtropical, sec ou aride.

R. MOREL.

Question : How do you determine mineralization rate (« Ewiger Roggenbau » Halle S).

M. TIMMERMANN.

Answer : The certain mathematical formula of the mineralization rate you can find in our printed paper. I beg you to inform in this way.

J. HÉBERT.

Question : After your 2nd paper, do you think that a greater biological activity (F.Y.M.) induces a less control of available (mineral) N ?

F. TIMMERMANN.

Answer : I think that a greater biological activity (as we have shown in the farmyard manure treated plot of the « Ewiger Roggenbau ») can bring problems with the suitable application of mineral nitrogen fertilizers. Due to weather conditions of individual years there can be for some critical times too much nitrate in the soil, causing negative yielding effects.

J. BOYELDIEU.

Question : Depuis 1935 à Göttingen et 1922 à Halle, vous nous avez dit que la variété de seigle était « Petkus ».

Y a-t-il eu d'autres modifications dans les variétés ou les *techniques* de culture ?

F. TIMMERMANN.

Answer : The question of Mr BOYELDIEU is, if there are changes in soil cultivation techniques also. I think so, but I can't give an answer about the influence of these changes on the results of the trials, because there are no special investigations about these special aspects.

M. GACHON.

Question : Dans les essais à long terme destinés à comparer les effets de la fumure minérale et de la fumure organique, on enlève généralement *toute la production aérienne* pour réinvestir de plus grandes quantités d'éléments nutritifs sous les deux

formes comparées. Ce faisant, on crée inévitablement un déséquilibre des bilans du carbone entre les traitements.

Pour éviter d'induire un tel déséquilibre au niveau du C, ne pensez-vous pas qu'il serait nécessaire de comparer fumure minérale et fumure organique *en présence de la restitution de tous les résidus des récoltes ?*

F. TIMMERMANN.

Answer : In the two permanent field trials « Göttingen E-Field » and « Ewiger Roggenbau » the straw, stems and others residues have been brought away from the field. If such great amount of organic material would be worked in the soil, the mineralization rate and may be the humus content would have changed. But this is only a theoretical point of discussion, because the results are obtained by another plan of the field trial. So I can't give a sufficient answer.

B. PACCOLAT.

Question : Vous constatez une grande différence dans les taux de minéralisation du sol entre les parcelles Témoin-NPK-Fumier.

Estimez-vous que les moyennes admises selon les types de sol et de climat (coefficient K_2 de Hénin) doivent être aussi différenciées selon que le sol a reçu des apports ou non de matière organique ?

Ou pensez-vous qu'avec un assolement normal, on n'aurait pas constaté une pareille différence ?

F. TIMMERMANN.

Answer : I can't give an answer, because we didn't determine the K_2 coefficient of Hénin. But certainly there should be other results, if instead of the rye monoculture a crop rotation had been investigated.

V. HERNANDO.

Question : Did have you some problems with the physical conditions of the soil (1st paper) ?

F. TIMMERMANN.

Answer : There are no results about investigations of this special problem in both trials « Göttingen E-Field » and « Ewiger Roggenbau » ; but I think that the high pH value and the amount of free $CaCO_3$ (4-5 p. 100 $CaCO_3$ in the soil of the « Göttingen E-Field ») should be sufficient for loess-soils to have a good physical condition.

L. GACHON.

Question : From experiences of Agdell and Saxmundham can you specify the concept of maintenance manure P and K, particularly from relations between the evolution of P, K level in soils and the increase balance import-export ?

G. E. G. MATTINGLY.

Answer : Yes ; the experiments do provide data from which the amounts of P and K needed by different crop can be calculated. On both Rothamshed and Saxmundham soils present evidence suggests that enough phosphate to grow at least

six crops of barley, swedes or sugar beet, on soils reasonably well-supplied with phosphate can be applied in one dressing. Potatoes always show a small benefit (1 to 2 t/ha) from giving phosphate every year.

J. C. IGNAZI.

Question : How do you explain the differents responses to P of barley and potatoes in Saxmundham experiments? root systems?

G. E. G. MATTINGLY.

Answer : Yes ; both the Agdell and Saxmundham soils are texturally heavy and difficult to work. On the chalky-boulder clay soil at Saxmundham the root system of potatoes develops slowly and the roots don't easily penetrate into the impervious soil. In these circumstances potatoes benefit both from an improved P status (from residus of fertilizers applied previously) and from freshly applied soluble phosphate. BARLEY is usually sown earlier in the year and benefits less from freshly-applied phosphate.

J. L. CABIROL.

Question : D'après votre essai sur les pommes de terre, et dans vos sols, quelle est la dose optimale en potasse permettant d'obtenir les meilleurs rendements?

Cette dose optimale est-elle pratiquée par les agriculteurs des Pays-Bas?

A. BOSWIJK.

Answer : On normal soils the optimum gift is ± 300 kg K_2O, given thus :

1st year, cereals	160 kg K_2O
2nd year, potatoes	175 kg K_2O
	335 kg K_2O

L. GACHON.

Question : Quelle(s) hypothèse(s) pouvez-vous avancer pour expliquer la richesse en phosphate du sol tourbeux sur lequel est situé votre essai?

A. BOSWIJK.

Answer : The reason that this peat soil is so rich in phosphate, is that the farmers had to use (obliged by the town of Gröningen) for manuring town refuse compost (from ± 1 650 till ± 1 900).

A. AMBERGER.

Question : What does this « KOK »-effect really mean and how do you explain it?

Are the applied amounts of potassium really in excess? isn't more a matter of the high tuber yields and therefore a sort of dilluting effect.

A. BOSWIJK.

Answer : I think the reason of the « KOK »-effect is a too high concentration of salts ; the applied amounts of K is not really in excess, but in the soil was a very high concentration of salts by the manuring for centuries by town refuse compost.

F. JACQUIN.

Question : Quelle était la capacité d'échange de ce sol contenant 27 p. 100 d'humus ?

S'agit-il d'humus, de carbone ou de matière organique résiduelle ?

L. C. N. DE LA LANDE CREMER.

Réponse : La capacité d'échange du sol de l'essai à Sappemeer ne fut pas déterminée.

— Il s'agit d'humus.

Mme BIGARD.

Question : Dans votre dernier tableau, comment expliquez-vous que le taux d'humus sur sol nu ne soit pas amélioré par l'apport régulier de fumier par rapport aux parcelles qui ne reçoivent pas de fumier ?

L. C. N. DE LA LANDE CREMER.

Réponse : Nous n'avons pas jusqu'à présent trouvé la réponse sur les irrégularités survenues entre 1961-1966 ; après le déplacement vers Haren les résultats devinrent normaux.

A. VEZ.

Question : Expérience SAPPEMEER.

Comment expliquez-vous qu'il n'y ait pratiquement pas de diminution de la matière organique avec plus de 25 p. 100 ?

Pourquoi une si faible minéralisation de l'humus rendant une fumure azotée encore nécessaire dans un tel sol ?

L. C. N. DE LA LANDE CREMER.

Réponse : Les changements dans le taux d'humus sont masqués par les irrégularités du terrain d'essai.

Les sols détourbés demandent de fortes fumures. La minéralisation de l'humus ne suffit à l'approvisionnement en azote (230 N/ha).

A. VEZ.

Question : Les baisses de rendement dans la monoculture du seigle sont-elles dues à des causes sanitaires (diseases) ?

— Avez-vous noté des différences dans l'état sanitaire de la monoculture selon les traitements.

P. RUCKENBAUER.

Answer : RYE is a very healthy plant so we did not notice any disease problems except some mildew attack on the plots treated with farmyard manure. Up to now we do not have any foot-diseases (take all, *Cercosporella*, etc.).

J. BOYELDIEU.

Question : Les apports de fumier et NPK sont annuels : sont-ils apportés aussi à la jachère ?

P. RUCKENBAUER.

Answer : Every year also the fallow is fertilized with NPK and farmyard manure, according to the lay out of the trial.

Miss Joan M. THURSTON.

Question : Did the weeds on your unfertilised plots include any leguminous species?

— If so, did the introduction of herbicides affect the N content of soil or crop?

P. RUCKENBAUER.

Answer : Some legumes were among the weeds, but at the time of weed trilling by hand no soil investigation concerning N were done, so we cannot determine the difference.

G. W. S. REITH.

Question : Have any trace elements (Cu, Mo, Zn, etc.) been determined in rye grain or in soil and, if so what differences are there between the three fertilizer treatments.

P. RUCKENBAUER.

Answer : No investigations were performed in relation to these elements.

J.-L. CABIROL.

Question : En monoculture de seigle, avez-vous fait des comptages de population des sols dans les trois traitements?

— Apportez-vous du soufre et de la magnésie dans vos sols?

P. RUCKENBAUER.

Answer : There were no fungal counts or microbiological investigations performed in the different treatments, but I agree, this should be done in the future to evaluate this trial to a greater extend as it is done up to now. No sulphur or magnesia is applied in this trial. Sulphur is supplied to a very great degree by the precipitation, because our location is 30 km eastward the industrial zone of Vienna and there is enough SO_2 in the air for the fertilization of the agricultural crops. At least the supply of superphosphate in the last years filled the gap for sulphur nutrition.

M. GOUÈRE.

Question :

1) La substitution du super triple aux scories n'a-t-elle pas accéléré la modification de la flore?

2) L'absence de P_2O_5 n'a-t-elle pas entraîné des baisses de teneurs très considerables?

A. Cottenie.

Réponse :

1) L'effet de la substitution du super triple aux scories est combiné avec celui de l'acidification sur les parcelles NPK ;

2) le tableau 4 montre que les teneurs en P_2O_5 des récoltes ont diminué de plus de 50 p. 100 sur les parcelles n'ayant pas reçu de fumure phosphatée.

V. Hernando.

Question : Can you explain the high values of Mn in table 4 ?

M. Cottenie.

Réponse : High Mn-contents correspond with a pronounced acidification of the parcels, where such effect is observed.

B. Paccolat.

Question : Il m'a semblé voir sur une figure que le témoin montrait une très grande différence entre le pH KCl et H_2O. Quelle en est la raison ?

A. Cottenie.

Réponse : Cela est en effet le cas et indique un degré d'épuisement en bases très prononcé.

4e SÉANCE — 4th SESSION

COMMUNICATIONS SUR LES ESSAIS DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE INTÉRESSANT LES ROTATIONS DE CULTURE

PAPERS ON LONG-TERM FERTILISER TRIALS CONCERNING CROP ROTATIONS

Président de séance : Professeur A. Amberger

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 839-854.

ÉTUDE DE LA FERTILISATION MINÉRALE SUR DES PARCELLES OÙ MONOCULTURES ET ROTATIONS CULTURALES SE SONT SUCCÉDÉ

R. LALOUX, J. POELAERT et A. FALISSE

Chaire de Phytotechnie des Régions tempérées
Faculté des Sciences agronomiques de l'État
B 5800 Gemboux (Belgique)

RÉSUMÉ

A Gembloux, les essais de longue durée entrepris en 1909 se poursuivent encore actuellement.

Les essais comportent quatre séries de cinq parcelles élémentaires, chacune des quatre séries comprenant :

une parcelle	sans fumure	(O)
—	avec fumure	NP
—	—	NK
—	—	PK
—	—	NPK

Les quatre séries se différencient entre elles par les cultures ou rotations de cultures.

Les résultats relatifs à la monoculture de pommes de terre pratiquée jusqu'en 1969 dans une des séries et ceux concernant les principales cultures pratiquées dans les autres séries, soit en monoculture, soit en rotation, sont exposés et commentés.

I. — INTRODUCTION

C'est à SCHREIBER et JOURNÉE, Professeurs à l'Institut agricole de Gembloux, qu'on doit l'établissement, en 1909, d'essais « de longue durée », actuellement encore en cours à la Faculté des sciences agronomiques de l'État, de Gembloux.

TILKIN succéda à JOURNÉE en 1941 et reprit en charge la responsabilité d'un dispositif expérimental où différents types de fumures étaient répétés depuis plus de trente ans déjà.

Actuellement et depuis 1958, la poursuite des essais incombe à LALOUX, Professeur à la Faculté des sciences agronomiques.

TABLEAU I

Succession des cultures

Années	Série II	Série III	Série IV
1910 à 1931	moutarde	féveroles	seigle
1932	pomme de terre	pomme de terre	seigle
33	betterave sucrière	pomme de terre	pomme de terre
34	pomme de terre	pomme de terre	betterave sucrière
35	avoine	betterave sucrière	féveroles
36	trèfle violet	maïs fourrager	pomme de terre
37	maïs grain	trèfle violet	betterave sucrière
38	betterave sucrière	trèfle violet	maïs fourrager
39	féveroles	betterave sucrière	tabac
1940	betterave sucrière	betterave sucrière	tabac
41	pomme de terre	pois	pois
42	pois	maïs grain	soja
43	maïs grain	pois	—
44	pois	maïs grain	—
45	pomme de terre	maïs grain	—
46	betterave fourragère	—	—
47	maïs grain	féveroles	—
48	pois	—	—
49	pavots	—	betterave fourragère
1950	betterave fourragère	—	pavots
51	pavots	—	betterave fourragère
52	pavots	—	—
53	betterave four. et sucr.	—	maïs grain
54	maïs grain	—	betterave four. et sucr.
55	betterave sucrière	—	maïs grain
56	maïs grain	—	betterave sucrière
57	betterave sucrière	—	maïs grain
58	maïs	—	betterave sucrière
59	betterave sucrière	—	maïs grain
1960	maïs grain	prairie	betterave sucrière
61	choux fourrager	—	maïs grain
62	pomme de terre	—	pomme de terre
63	maïs fourrager	—	tournesol
64	tournesol	—	maïs grain
65	pomme de terre	—	pomme de terre
66	—	—	—
67	—	—	—
68	—	pomme de terre	—
69	orge	orge	orge
1970	pomme de terre	pomme de terre	pomme de terre
71	haricots	—	haricots
72	pomme de terre	—	pomme de terre
73	—	—	—
74	—	—	—
75	haricots	—	—

II. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Il comporte quatre séries de cinq parcelles d'une superficie de 60 m² chacune. Une parcelle élémentaire a reçu chaque année un même type de fumure.

Les types de fumure sont :

O : aucune fumure,
NP : fumure azotée et phosphatée,
NK : fumure azotée et potassique,
PK : fumure phospho-potassique,
NPK : fumure azotée et phospho-potassique.

Les quatre séries se différencient entre elles par la culture établie. A l'intérieur d'une même série, les traitements (types de fumure) ne sont pas répétés.

A l'origine et jusqu'aux environs de 1930, toutes les séries ont été cultivées en monoculture :

— pomme de terre dans la série I,
— moutarde dans la série II,
— féverole dans la série III,
— seigle dans la série IV.

La pomme de terre a été maintenue dans la série I jusqu'en 1975, sauf en 1969 (orge de printemps, sans résultats).

La succession des cultures dans les autres séries est reprise au tableau 1.

Les rotations de cultures pratiquées dans les séries II, III et IV, peuvent paraître un peu fantaisistes. On remarque notamment l'absence quasi totale de céréales panifiables après 1930.

Cela s'explique par le fait qu'une récolte de céréales sur le terrain expérimental est toujours fortement compromise par d'importants dégâts d'oiseaux. Ceux-ci sont particulièrement nombreux du fait de la proximité immédiate d'un terrain boisé.

L'importance des fumures NPK a été adaptée d'après la culture, mais elle a aussi varié d'après l'époque.

Ainsi, au départ, les fumures NPK étaient :

		Fumures en U/ha		
Séries	Cultures	N	P_2O_5	K_2O
I	Pomme de terre	25	65	150
II	Moutarde	12,5	65	150
III	Féverole	15	65	150
IV	Seigle	12,5	65	75

Ensuite les fumures minérales ont été augmentées progressivement, surtout en ce qui concerne l'azote pour atteindre, en pomme de terre par exemple, les niveaux suivants :

	N	P_2O_5	K_2O
1915 à 1919	40	45	150
1920 à 1935	60	70	140
1936 à 1946	80	80	160
1947 à 1950	100	120	160
1951 à 1975	120	120	160

A partir de 1951, les niveaux de fumure NPK n'ont plus été adaptés d'après le type de culture, c'est-à-dire que chaque parcelle où une fumure NPK est prévue, a reçu chaque année, depuis 1951, 120 U d'N, 120 U de P_2O_5 et 160 U de K_2O par hectare.

III. — PRINCIPAUX RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Il serait beaucoup trop long de vouloir reprendre dans ce texte tous les résultats expérimentaux. L'intérêt de chaque résultat individuel est d'ailleurs très limité étant donné que, pour une même année et une même culture, les traitements ne sont pas répétés.

La comparaison des rendements individuels n'a ainsi que très peu de signification.

Nous avons choisi de présenter les résultats de la façon suivante :

— pour les monocultures : rendements regroupés par série et par décennie;

— pour les rotations de cultures : rendements regroupés par plante cultivée et par décennie, à travers les différentes séries.

TABLEAU 2

Résultats obtenus sur pommes de terre cultivées en monoculture ou en rotation
(en kg/ha et respectivement en p. 100 du témoin NPK 1910-1919 pour les monocultures et en p. 100 du témoin NPK 1930-1939 pour les rotations)

Années		NPK	PK	NK	NP	O
1910-1919 Monoculture	(9)*	25 517 *100* %	20 657 80,95	23 474 91,99	14 545 57,00	13 407 52,54
1920-1929 Monoculture	(10)	22 577 88,48	16 674 65,34	21 468 84,14	10 693 41,90	8 095 31,86
1930-1939 Monoculture	(10)	24 610 96,45	16 536 50,12	23 449 86,74	11 466 42,38	8 988 30,01
Rotation	(6)	37 355 *100* %	32 911 88,10	36 923 98,84	26 471 70,86	24 346 65,17
1940-1949 Monoculture	(10)	21 338 83,62	11 087 43,45	19 190 75,20	9 376 36,74	6 640 26,02
1950-1959 Monoculture	(10)	22 566 88,41	11 052 43,30	22 162 86,83	10 040 39,33	7 133 27,95
1960-1969 Monoculture	(10)	23 510 92,14	9 840 38,56	22 673 88,86	11 528 45,18	4 987 19,54
Rotation	(9)	33 724 90,28	19 831 53,09	35 379 94,71	18 487 50,82	12 668 33,91
1970-1974 Monoculture	(4)	22 089 86,56	13 806 54,10	20 906 81,95	15 661 61,37	6 121 23,99
Rotation	(4)	19 402 52,28	11 995 32,32	19 528 52,61	13 756 37,06	7 749 20,88

* ( ) Nombre de résultats observés au cours de la décennie.

En outre, nous n'envisagerons comme cultures que :

— la pomme de terre, soit en rotation ou en monoculture ;
— la betterave sucrière en rotation ;
— la féverole en monoculture jusqu'en 1931, suivie de cultures en rotation ;
— la moutarde en monoculture jusqu'en 1931.

Le seigle, pratiquement cultivé en monoculture jusqu'en 1932, n'est pas repris parce que les résultats sont trop aléatoires suite aux importants dégâts d'oiseaux qui sont d'ailleurs signalés dans les dossiers de l'époque.

A. — *Résultats obtenus sur pommes de terre*

1° *Évolution des rendements au cours du temps lorsqu'une fumure NPK est appliquée :*

a) *En monoculture* (tabl. 2, fig. 1).

On observe une tendance générale à la baisse des rendements au cours du temps ; elle est évidente, mais peu importante.

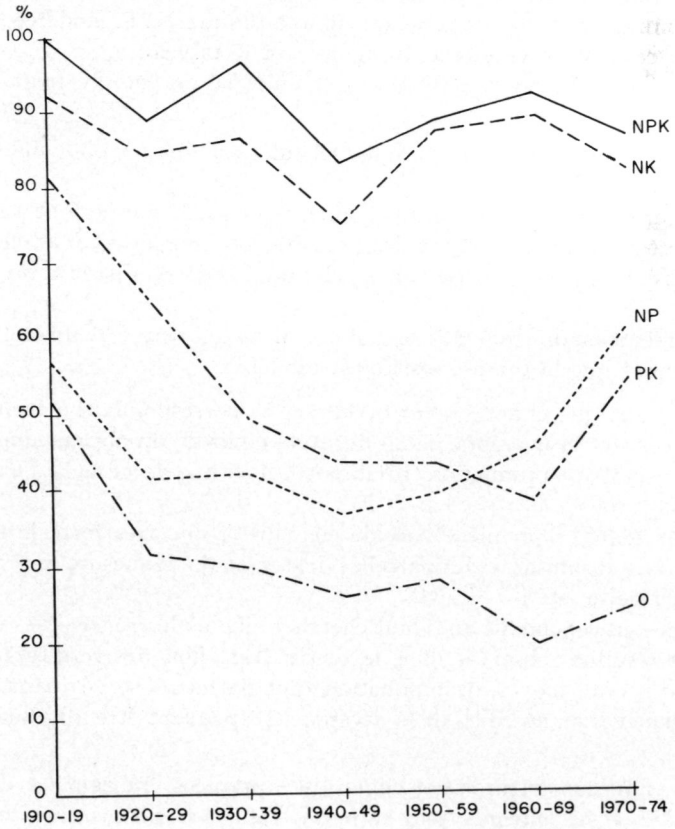


FIG. 1. — *Résultats obtenus sur pommes de terre cultivées en monoculture* (en p. 100 du témoin NPK 1910-1919)

Si on compare les rendements obtenus en monoculture et ceux obtenus en rotation (tabl. 2), il paraît évident que la chute des rendements résultant de la monoculture a été compensée dans une large mesure par certains facteurs comme l'amélioration des techniques culturales, l'emploi de variétés plus productives, les traitements contre les ennemis, l'augmentation des fumures, etc.

En effet, l'ordre de grandeur des rendements obtenus en culture sous rotation entre 1930 et 1939 est de 37 000 kg/ha. Ces rendements sont obtenus dans des parcelles qui, depuis 1909, n'ont plus reçu de fumier, d'amendement organique ou d'engrais vert. Les résidus de récolte ont été enlevés chaque année. S'il n'y avait eu le progrès dans la culture de la pomme de terre ou le jeu d'autres facteurs au cours du temps, les rendements obtenus dans les séries II, III et IV entre 1930 et 1939 n'auraient pas dû être de beaucoup supérieurs à ceux obtenus dans la série I aux environs de 1910 puisque, jusqu'à cette époque, toutes les parcelles devaient être en bon état de structure et de fertilisation organique notamment.

La différence étant d'environ 12 000 kg/ha, on peut estimer en première approximation, que celle-ci correspond à l'amélioration des variétés, aux progrès techniques, à l'augmentation des fumures azotées notamment, etc.

On peut donc dire que les pertes réelles de rendement suite à une longue monoculture de pommes de terre, ne recevant qu'une fumure NPK modérée, sont de loin supérieures à celles observées dans la figure 1 et le tableau 2.

Les principaux facteurs pouvant entrer en ligne de compte pour expliquer la chute des rendements sont :

— la dégradation de la structure du sol suite à l'absence d'amendements organiques et minéraux ;

— une carence relative en éléments autres que NPK qui ne sont plus apportés ;

— l'infestation du terrain par des parasites ou ennemis ; on admet cependant généralement que ce facteur ne peut plus jouer un rôle déterminant après la 1re décennie ;

— la diminution du stock d'N organique du sol qui peut être un facteur d'autant plus déterminant que la fumure azotée est modérée.

Malgré le fait que chaque point de la courbe correspondant à la fumure NPK dans la figure 1 soit la moyenne de 10 résultats environ, on obtient une ligne brisée montrant des écarts de production très importants d'une décennie à d'autre (dans un cas 12 p. 100).

On serait tenté, à première vue, de conclure à une très forte imprécision des résultats (surface insuffisante des parcelles, instruments de mesure imprécis, manque de soins à la récolte, etc.).

Nous pensons cependant qu'il faut chercher ailleurs les raisons des grandes irrégularités des résultats observés dans le temps. En effet, des résultats de très loin supérieurs au niveau moyen de production sont parfois observés pendant plusieurs années consécutives ou au cours de la décennie. Ils peuvent être attribués principalement à :

— des conditions culturales et climatiques propices, limitant les dégâts causés par les maladies et les ennemis, tout en permettant la minéralisation d'une quantité importante de N à partir de la matière organique du sol. Celle-ci s'ajoute à N minéral appliqué ;

— ils peuvent être liés aussi, dans une certaine mesure, au type de pomme de terre cultivé.

La situation inverse s'est couramment produite dans le passé.

C'est donc dans les conditions culturales et climatiques, ainsi que dans le choix — variable dans le temps — du type de variété, qu'il faut rechercher les principales raisons de la variabilité des résultats obtenus sur pommes de terre en monoculture lorsqu'une fumure NPK est appliquée.

b) *En rotation de culture* (fig. 2).

Les pommes de terre viennent en rotation de culture à partir de la décennie 1930-1939, sur des parcelles où, depuis 1910, d'autres cultures ayant reçu le même type de fumure NPK ont été pratiquées.

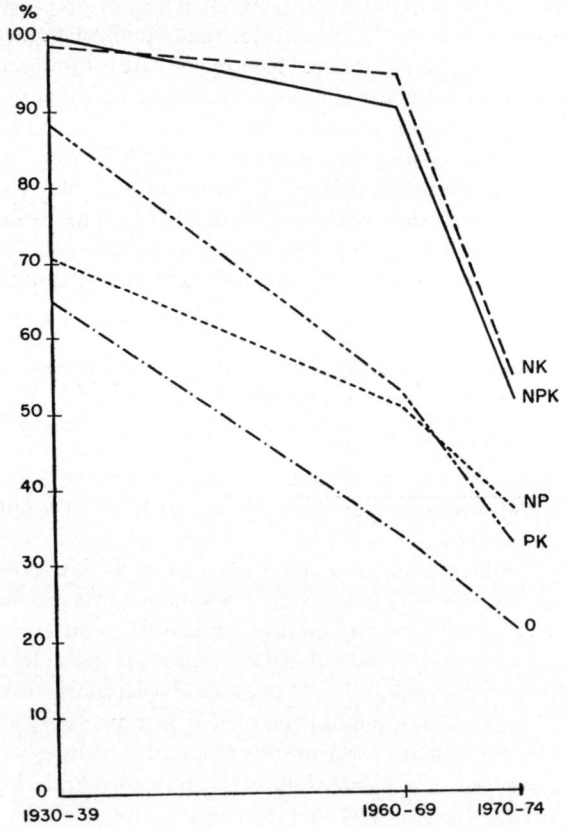


FIG. 2. — *Résultats obtenus sur pommes de terre cultivées en rotation*
(en p. 100 du témoin NPK 1930-1939)

On observe, jusqu'au cours de la décennie 1960-1969, des niveaux de rendements de loin supérieurs à ceux observés, à la même époque, dans les parcelles consacrées à la monoculture. Ces différences de rendements sont évidemment l'expression globale des avantages de la rotation de culture par rapport à la monoculture.

Ces avantages résultent principalement des points suivants :

— en rotation de culture, le sol est évidemment moins infesté d'ennemis et de parasites végétaux et animaux ;

— les cultures pratiquées (seigle, moutarde, féverole) entre 1910 et 1930, sont des cultures moins exigeantes que la pomme de terre. En 1930, le stock organique et minéral était donc beaucoup moins entamé dans les parcelles où la pomme de terre succédait à une culture telle que seigle, moutarde, féverole, que dans celles où elle se succédait à elle-même depuis 1910 ;

— on peut encore supposer que, dans certaines circonstances, une culture déterminée peut « mobiliser » plus facilement certains éléments qu'une autre. Une partie de ces éléments restitués, par les racines notamment à la fin de la culture, peut servir pour la plante suivante.

A partir de 1970, pour la pomme de terre en rotation de culture avec fumure NPK, une chute impressionnante du niveau des rendements est observée, ceux-ci rejoignant pratiquement ceux obtenus lorsque la monoculture est pratiquée depuis 1910.

L'explication du phénomène est simple : entre 1970 et 1974, quatre cultures de pommes de terre ont été établies en cinq ans.

Cela nous ramène donc à une monoculture de fait. De plus, à partir de cette époque, une technique moderne de culture a été adoptée. Celle-ci consistant essentiellement en un buttage immédiat après la plantation et en un désherbage chimique en prélevée, favorise fortement le développement de certaines adventices spécialement adaptées. Celles-ci, en devenant très envahissantes, ont contribué à niveler les rendements.

2° *Évolution des rendements en pommes de terre, au cours du temps, lorsqu'une fumure NK est appliquée (parcelles sans phosphore).*

a) *En monoculture* (tabl. 2, fig. 1).

Il existe dans la figure 1 un parallélisme surprenant entre les courbes représentant les résultats obtenus lorsqu'une fumure NK ou NPK est appliquée. L'écart entre les deux courbes est très réduit.

Les résultats individuels montrent que l'écart peut varier sensiblement d'après les conditions de l'année. Les différences de rendement entre les parcelles recevant une fumure NPK et celles ne recevant qu'une fumure PK sont très généralement les plus élevés lorsque le niveau de rendement de l'année est très élevé ou très bas.

Dans nos conditions expérimentales, le stock de P assimilable est donc encore important, même dans les parcelles qui n'ont pas reçu de fumure phosphatée pendant plus de soixante ans. Ceci est d'ailleurs confirmé par des analyses du sol effectuées en 1972.

La pomme de terre, par sa capacité d'absorption de formes de P peu assimilables, et probablement par des besoins réels relativement faibles, réagit peu à l'absence d'apport de P même pendant une très longue période. Appliquer une fumure phosphatée sur pommes de terre dans un sol bien pourvu ne peut constituer un élément déterminant du rendement.

Il faut cependant se garder de généraliser, étant donné que des facteurs tels que conditions climatiques, types de sols, types de pommes de terre, potentiel de production de la variété, etc., peuvent jouer un rôle important notamment de la manière suivante : le stock de P assimilable dépend de la teneur et du type de sol, mais varie

relativement peu en fonction des conditions de l'année. Il peut donc être un facteur limitant qui s'extériorisera d'autant plus que les autres facteurs sont plus propices à une production élevée. Par contre, en conditions moins favorables, la croissance du système radiculaire sera moins importante et son développement moins rapide. On sait que l'absorption du phosphore dépend étroitement du développement du chevelu radiculaire. Il en résulte que le stock de P assimilable restant à peu près constant, l'absorption de cet élément devient plus difficile.

b) *En rotation de culture* (tabl. 2 et fig. 2).

En rotation de culture, l'incidence sur les rendements en pomme de terre du phosphore minéral appliqué pendant plus de soixante ans, apparaît comme nulle, sinon négative.

Une analyse du sol, réalisée en 1972 montre cependant une « bonne teneur » dans les parcelles où cet élément a été appliqué pendant plus de soixante ans et une teneur « très insuffisante » dans les parcelles où il n'est plus appliqué depuis 1909.

Des constatations précédentes, il ressort que :

— les formes de phosphore assimilable ne sont probablement pas les mêmes pour toutes les plantes ;

— pour la méthode d'analyse de sol utilisée (extractif = lactate d'ammonium), il n'y a pas de corrélation entre les résultats d'analyses du sol et les rendements comparés des parcelles recevant ou ne recevant pas de fumure phosphatée minérale.

3° *Évolution des rendements en pommes de terre, au cours du temps, lorsqu'une fumure NP est appliquée (parcelles sans K).*

a) *En monoculture* (tabl. 2 et fig. 1).

Dans les parcelles où, au cours des années successives, aucune fumure potassique n'a été appliquée, on observe à partir de la deuxième année une chute sensible du rendement par rapport au témoin où cet élément est apporté régulièrement. La chute de production s'accélère au cours des années suivantes pour se stabiliser au bout de la première décennie aux environs de 40 p. 100 du rendement du témoin.

Entre les années 1970 et 1975 cependant, on assiste à une remontée spectaculaire des rendements si on les compare au témoin où une fumure potassique est appliquée chaque année.

Des résultats observés dans les parcelles en monoculture de pommes de terre, où depuis 1909 il n'y a plus eu de fumure potassique, on peut déduire que :

— si on n'applique plus cet élément pendant plusieurs années sur une monoculture de pommes de terre, le stock de potasse assimilable du sol, pour cette plante, diminue très rapidement avec une répercussion grave sur les rendements ;

— après un laps de temps relativement court, un équilibre s'établit à un niveau de rendement bas. La quantité de K assimilable se libérant à partir du stock de K total devient à peu près constante ;

— la remontée des rendements à partir de 1970 s'explique par la culture d'orge qui a interrompu la monoculture de pomme de terre en 1969 (voir II, p. 841). De ce fait :

— le stock de K assimilable s'est reconstitué dans une certaine mesure, l'orge étant moins exigeante en K que la pomme de terre. Il est cependant peu probable que l'importance de ce phénomène soit déterminante ;

— la culture d'orge a laissé, comme résidus, des chaumes et un système radiculaire contenant une certaine quantité de K plus facilement assimilable pour les cultures suivantes ;

— en somme, on peut dire que la culture d'orge a « mis en circulation » une certaine quantité de K qui, jusque-là, était inassimilable par la pomme de terre.

b) *Culture en rotation.*

Dans les cultures en rotation, les rendements des parcelles où aucune fumure potassique n'est appliquée depuis plus de soixante ans, sont restés pendant plusieurs décennies à un niveau beaucoup plus élevé que les parcelles correspondantes cultivées en monoculture. C'est-à-dire que le facteur limitant K, quoique encore très important, s'est manifesté avec beaucoup moins d'intensité.

De plus, dans le cas qui nous occupe, la chute des rendements au cours du temps est progressive.

On peut estimer que ces faits résultent de ce que, en rotation de cultures, un certain nombre de plantes, même si elles se trouvent dans une situation carencée en K, « mobilisent » une quantité de K non négligeable qui peut être utilisée par la ou les cultures suivantes.

Il en résulte que tous les prélèvements se faisant, dans le cas qui nous occupe, aux dépens du stock de K du sol, la courbe des rendements reprise à la figure 2 peut être considérée en somme, comme une image de la diminution du stock de K assimilable du sol.

4° *Évolution des rendements en pommes de terre lorsqu'une fumure PK est appliquée (parcelles sans N).*

a) *En monoculture* (tabl. 2, fig. 1).

La chute des rendements est immédiate, c'est-à-dire qu'elle s'observe nettement dès la première année. Il est curieux de constater cependant que, à la fin de la première décennie, la chute de rendement est nettement moins importante que dans le cas des parcelles où n'a pas été appliqué de fumure potassique. La chute des rendements se poursuit au cours des deuxième, troisième et jusqu'à la quatrième décennies. Ensuite et jusqu'en 1968 (année où la culture d'orge a interrompu la monoculture), on assiste à une stabilisation, à un niveau bas, des rendements. A partir de 1970, la courbe des rendements remonte sensiblement ; on sait que N libéré par le sol pour une culture déterminée, provient de la minéralisation de N organique (humus) du sol. Le taux de cette minéralisation dépend de nombreux facteurs ; il est lié entre autres au taux d'humus du sol. Cela signifie que la quantité de N fournie par le sol à la culture de pomme de terre dans les parcelles qui n'ont plus reçu de fumure azotée depuis 1909, diminue d'année en année pour deux raisons :

— à taux de minéralisation égal, le stock de N organique s'amenuisant au cours des années, N fourni par le sol diminue dans les mêmes proportions ;

— le taux de minéralisation diminue également du fait de la diminution du stock de N organique.

La première partie de la courbe des rendements reflète ces phénomènes.

La seconde partie (presque horizontale) correspond à une stabilisation de la

production au cours du temps. Elle traduit le fait que le taux de minéralisation, devenu faible, ne modifie plus que très peu le stock de N organique.

A remarquer que l'interruption de la monoculture de pomme de terre par une culture d'orge, joue un rôle primordial sur la fourniture de N par le sol à la culture de pomme de terre.

Pour expliquer cette dernière partie de la courbe, on peut invoquer bien sûr, le fait que l'orge soit très peu exigeante en N, mais il faut aussi, pensons-nous, tenir compte de l'économie en azote du sol, notamment celui provenant de la minéralisation d'arrière-saison, qui a été excellente au cours des années 1972, 1973 et 1974. Cette dernière affirmation peut être appuyée par les arguments suivants :

— une pluviométrie faible, au cours des hivers 1970-1971, 1971-1972, 1973-1974, a réduit la lixiviation de N minéralisé en arrière-saison ;

— les analyses de N minéral (NO_3 et NH_4) réalisées dans les mêmes types de sols de la région après l'hiver, ont montré une richesse élevée.

b) *En rotation de culture* (tabl. 2, fig. 2).

Dans les parcelles où la pomme de terre intervient dans une rotation de culture établie après 1930, et où, depuis 1909, plus aucune fumure azotée n'a été appliquée, on observe des rendements relativement élevés entre 1930 et 1939, si on les compare à ceux obtenus à la même époque en monoculture.

Les rendements décroissent ensuite au cours du temps et la chute s'accélère très nettement entre 1970 et 1974.

On remarque cependant que la baisse des rendements, au cours de ces quatre années, est moins rapide pour les parcelles n'ayant plus reçu de N depuis 1909, que pour celles ayant reçu une fumure NPK complète. Ceci confirme ce que nous venons de dire ci-dessus au sujet de l'économie en N des sols au cours des années 1971, 1972, 1973 et 1974.

Remarquons pour terminer que, entre 1970 et 1974, les rendements des parcelles sans N, en culture de rotation, sont inférieurs ou, au plus, au même niveau que ceux obtenus en monoculture (avec une année d'interruption).

Les raisons sont les mêmes que celles invoquées ci-dessus pour expliquer la chute des rendements à partir de 1970 lorsqu'une fumure NPK a été appliquée en rotation de culture.

5° *Évolution des rendements en pommes de terre au cours du temps, lorsqu'aucune fumure n'est appliquée.*

Il est évident que lorsqu'aucune fumure n'est appliquée, les rendements sont inférieurs à ceux obtenus lorsque les trois éléments N, P, K ou deux d'entre eux sont appliqués.

Ils sont cependant moins bas que ceux auxquels on pourrait s'attendre si on considère les rendements obtenus lorsqu'un seul des trois éléments et principalement N ou K n'est pas appliqué.

L'explication est simple : les exportations, dans ces parcelles sans N, sont dès le départ moins importantes que dans n'importe quelle autre. Le stock des éléments N, P et K du sol s'épuise donc à un rythme moins rapide que dans les parcelles où seul un de ces éléments n'a pas été apporté.

Nous n'accordons qu'un crédit limité à la question d'équilibre entre N, P et K.

En effet, comme le rythme d'épuisement des stocks de N, P ou K assimilables est très différent selon l'élément considéré, même dans les parcelles où aucun de ces éléments n'est appliqué, le déséquilibre devrait être important dès la fin de la première décennie, ce qui n'est pas toujours le cas.

B. — *Résultats obtenus sur les autres cultures*

1° *La Moutarde* (tabl. 3).

La moutarde a été cultivée pratiquement en monoculture jusqu'en 1931, dans la série II des parcelles d'essais de longue durée.

TABLEAU 3

Moutarde

Monoculture			NPK	PK	NK	NP	O
1910-1919	A 2	(7)*	1 691 100 %	1 240 73,4	1 598 94,6	1 616 95,6	1 198 70,8
1920-1929	A 2	(7)	1 127 100	798 70,8	1 073 95,2	875 77,6	763 67,7
1930-1939	A 2	(2)	1 084 100	809 74,6	717 66,1	875 80,7	792 67,7

* ( ) Nombre de résultats observés au cours de la décennie.

Cette culture carencée en N, P ou K réagit de manière tout à fait différente de la pomme de terre.

La chute de rendement observée lorsque, au cours des années successives, on n'applique pas de fumure azotée, est plus importante dès la fin de la première décennie, mais paraît se stabiliser dès cette époque.

La chute des rendements dans les parcelles carencées en P paraît nettement plus importante pour la moutarde que celle observée sur pomme de terre.

Le rôle de la fumure potassique, par contre, paraît nettement moins important que chez la pomme de terre.

L'ensemble de ces constatations rend compte entre autres :

— des exportations qui sont moindres en N et K notamment pour la moutarde que pour la pomme de terre ;

— de la capacité d'absorption de certains éléments (N et P par ex.), qui peuvent être très différents d'après la plante dont il s'agit.

2° *La Féverole* (tabl. 4).

Cette plante, cultivée en monoculture dans la série III des parcelles expérimentales, est intervenue ensuite dans la rotation de culture pratiquée dans cette série.

TABLEAU 4

Féverole

Monoculture			NPK	PK	NK	NP	O
1910-1919	A 3	(8)*	1 594 100 %	1 590 99,8	1 543 96,8	1 502 94,2	1 481 92,9
1920-1929	A 3	(8)	1 261 100	1 102 87,4	1 100 87,2	1 404 111,3	784 62,2
1930-1939	A 3	(2)	1 396 100	1 342 96,1	1 225 87,8	1 308 93,7	675 48,4
Rotation 1940-1949	A 3	(2)	1 449 100	1 079 74,5	874 60,3	733 50,6	781 53,9
1950-1959	A 3	(8)	2 083 100	1 777 85,3	1 545 74,2	681 32,7	693 33,3

TABLEAU 5

Betteraves sucrières
(rendements sucre kg/ha)

Rotation			NPK	PK	NK	NP	O
1930-1939	A 2	(2)*	7 703 100 %	3 847 49,9	7 027 91,2	5 886 76,4	4 801 62,3
	A 4	(2)	9 412 100	5 498 58,4	7 921 84,2	5 254 55,8	5 210 55,4
1950-1959	A 2	(3)	8 310 100	3 872 46,6	6 233 75,0	1 876 22,6	2 665 33,1
	A 4	(3)	8 129 100	2 996 36,9	5 240 64,5	3 237 39,8	3 887 47,8

* ( ) Nombre de résultats observés au cours de la décennie.

Comparativement aux résultats obtenus sur pomme de terre, on observe que :

— la féverole étant une légumineuse, l'effet d'un apport d'N est beaucoup moins important que pour la pomme de terre. C'est ainsi que, dans nos conditions expérimentales, il a fallu plus d'une décennie pour que cet effet devienne sensible ;

— comme pour la moutarde, le fait de ne plus appliquer de P pendant plusieurs décennies a un effet beaucoup plus grand en culture de féveroles qu'en culture de pommes de terre ;

— par contre, avant que le rôle du potassium apparaisse clairement, il a fallu supprimer l'apport de K dans les parcelles correspondantes pendant un laps de temps beaucoup plus long que s'il s'agissait de culture de pomme de terre.

Après quelques décennies cependant, les chutes de rendements s'accentuent et deviennent très importantes dans les parcelles ne recevant pas de K.

3° *La Betterave sucrière* (tabl. 5).

La betterave sucrière a été cultivée en rotation de culture dans les séries de parcelles II, III et IV, principalement au cours des décennies 1930-1939 et 1950-1959.

Le comportement de la betterave se distingue de celui de la pomme de terre, essentiellement par ses exigeances en P, qui, dès la première décennie, sont manifestes.

Par ailleurs, comme pour la pomme de terre, la chute des rendements pour des parcelles ne recevant pas d'N est très importante. Ainsi, parmi les plantes qui ont été étudiées dans l'essai de longue durée établi à Gembloux et dont les résultats sont repris dans le présent exposé, la betterave apparaît comme étant la plante la plus exigeante en éléments N, P et K.

IV. — CONCLUSIONS

Si les essais de longue durée établis à Gembloux en 1909 présentent quelques faiblesses majeures, telles que le manque de répétitions des traitements et une situation ne permettant pas l'établissement de rotations normales, les résultats ne manquent néanmoins pas d'intérêt.

Ils mettent en évidence notamment :

— les interactions qui peuvent exister entre l'alimentation minérale et la succession des cultures. C'est probablement dans cette question d'alimentation minérale qu'il faut chercher la principale raison pour laquelle les rendements en pomme de terre, par exemple, sont fortement affectés par une longue monoculture ;

— à quel point le rythme d'épuisement du stock en éléments assimilables peut varier d'un élément à l'autre ;

— que la fourniture d'un élément par le sol à la culture, dépend bien sûr du degré d'épuisement du sol en cet élément, mais aussi, dans une mesure très large, de la plante cultivée et même du ou des précédents culturaux.

Reçu pour publication en septembre 1976.

SUMMARY

STUDY OF MINERAL FERTILIZATION ON PLOTS SUCCESSIVELY PUT TO MONOCULTURES AND CROP ROTATIONS

The long-term experiments undertaken in 1909 in Gembloux are still in progress.

The experiments concern 4 series of 5 elementary plots ; each of the four series including :

a plot without manure (0),
a plot with NP supply,
a plot with NK supply,
a plot with PK supply,
a plot with NPK supply.

The four series differentiate from one another through the cultures or crop rotations.

The results concerning the potato monoculture carried out until 1969 in one series and those concerning the main cultures carried out in the other series either in monoculture or in rotation are described and discussed.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER MINERALDÜNGUNG AUF PARZELLEN MIT AUFEINANDERFOLGENDEN MONOKULTUREN UND WECHSELKULTUREN

Die seit 1909 in Gembloux untergenommenen langfristigen Versuche sind heute noch weitergeführt.

Die Versuche bestehen aus 4 Serien von 5 Grundparzellen ; jede Serie besteht aus :

einer ungedüngten Parzelle (0),
einer mit NP gedüngten Parzelle,
einer mit NK gedüngten Parzelle,
einer mit PK gedüngten Parzelle,
einer mit NPK gedüngten Parzelle,

Die vier Serien weichen von einander auf Grund der Kulturen und Wechselkulturen ab.

Die Ergebnisse für die bis 1969 in einer Serie durchgeführte Kartoffelmonokultur und die für die Hauptkulturen der anderen Serien entweder als Monokultur oder als Wechselkutur erzielten Ergebnisse sind beschrieben und erklärt.

РЕЗЮМЕ

Изучение минерального удобрения на делянках с чередованием монокультур и севооборотов.

Р. ЛАЛУ, Ж. ПУЕЛЕРТ, А. ФАЛИСС.

Долгосрочные опыты, начатые в 1909-м году в Жамблу (Бельгия) продолжаются еще в настоящее время.

Опыты эти состоят из 4-х серий, по 5-ти элементарных делянок :
одна делянка без удобрений (O),
одна делянка с удобрением NP,
одна делянка с удобрением NK,
одна делянка с удобрением PK,
одна делянка с удобрением NPK,

Четыре серии отличаются кроме того одна от другой своими культурами, или ротациями культур.

В данной работе указываются и комментируются результаты монокультуры картофеля, практиковавшейся в одной из серий до 1969-го года, и результаты главных монокультур и севооборотов других серий.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 855-879.

QUELQUES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX OBTENUS SUR LE CHAMP DEHÉRAIN

R. MOREL, Catherine CHABOUIS et S. BOURGEOIS
avec la collaboration technique de Thérèse LASNIER et Françoise COPPIN

Chaire de Science du Sol,
Institut national agronomique Paris-Grignon,
78850 Thiverval Grignon

RÉSUMÉ

Le dispositif Dehérain d'essais de longue durée, implanté en 1875, comporte des parcelles sans aucune fertilisation, des parcelles recevant des fumures organiques, minérales ou privées de l'un des éléments nutritifs N, P ou K. Les résultats expérimentaux concernent le sol, les végétaux et un essai sur de petits animaux nourris avec les récoltes du champ.

Parmi les études faites sur le sol, deux d'entre elles se rapportent l'une à l'azote, l'autre au phosphore ; la première fait l'objet d'un mémoire spécial. La seconde concerne l'évolution du caractère d'échangeabilité du phosphore, abordée par cinétique isotopique ; cette méthode permet de proposer des éléments de différenciation pour les divers traitements du dispositif (voir texte).

La production végétale (blé, betterave sucrière) est présentée quant à son évolution dans le temps et dans son importance quantitative (rendements). Outre l'absence totale de fumure, la déficience en azote et, pour la betterave, la carence en phosphore sont particulièrement ressenties. L'un des essais a pour objet l'étude des conséquences de la reprise d'une fertilisation minérale sur des parcelles demeurées sans aucune fumure depuis 1902 ; un niveau de production égal à celui des parcelles fertilisées depuis la même date a été atteint dès la première année pour le blé, après trois ans pour la betterave.

La composition des grains pour le blé, ainsi que celle des divers organes de la plante, révèle généralement peu de différences entre les traitements et, en particulier entre ceux comportant des fumures soit exclusivement minérales, soit uniquement organiques. L'absence d'un élément nutritif (N, P ou K) a plus de conséquences qu'une diminution générale du potentiel nutritif du sol (parcelles sans aucune fumure).

En ce qui concerne le blé, les qualités technologiques des diverses fractions du grain (farine, remoulages, sons) varient très peu selon les traitements ; l'absence de potassium présente toutefois des effets plus marqués. Sur la betterave sucrière, l'absence de phosphore est très préjudiciable à la pureté des jus ; le taux d'azote aminé, notamment, peut atteindre le double de la valeur trouvée pour les autres traitements.

Des essais ont été effectués sur des souris nourries avec les récoltes des parcelles sans engrais depuis 1902, recevant une fumure minérale NPK ou exclusivement fertilisées au fumier d'étable. Aucune différence ne s'est manifestée quant à l'état sanitaire des animaux ; toutefois, les souris alimentées avec les végétaux des parcelles ne recevant que du fumier se sont révélées moins fécondes.

1. — APERÇU HISTORIQUE

Le Centre de Grignon de l'I.N.A., Paris-Grignon [1] possède plusieurs champs expérimentaux dont le plus ancien fut implanté en 1875 par P. P. DEHÉRAIN, professeur à l'École d'Agriculture de Grignon et au Muséum d'Histoire naturelle de Paris.

L'ère des engrais chimiques était alors largement ouverte, la première manufacture d'engrais phosphatés (superphosphates) ayant été édifiée en 1842 par LAWES à Depford, près de Londres. L'année suivante, LAWES et GILBERT créaient sur la ferme de Rothamsted les premiers dispositifs d'essais sur les cultures, dans le but d'élucider « des problèmes relatifs aux engrais et aux récoltes ». En France, G. VILLE établissait en 1861 à Vincennes, près de Paris, un champ d'expériences destiné à des essais sur les engrais chimiques ; les résultats obtenus font alors l'objet de nombreuses publications (VILLE, 1868). Entretenu grâce à un appui financier personnel de l'empereur Napoléon III, ce dispositif n'a malheureusement pas été conservé.

En 1875, d'une façon tout à fait indépendante, DEHÉRAIN mesure également tout le bénéfice qu'il serait possible de retirer d'une expérimentation raisonnée pour résoudre les problèmes posés par la fertilisation des récoltes ; aussi obtient-il, sur le domaine de l'École de Grignon, la cession d'un terrain de un hectare environ sur lequel il pourrait conduire tous les essais qu'il lui paraîtrait opportun d'entreprendre. Notons ici avec intérêt les questions que DEHÉRAIN se proposait d'étudier, et dont certaines relèvent de préoccupations toujours actuelles (DEHÉRAIN, 1876) :

— influences physique et chimique de l'humus de la terre arable ;

— influence qu'exercent sur l'abondance de la récolte la nature et la composition des engrais chimiques ;

— influence de la composition, de l'abondance et des modes d'épandage des engrais sur la composition des plantes récoltées ;

— modifications que subissent les plantes quand elles sont soumises pendant une longue suite de générations aux mêmes procédés de culture.

2. — LE CHAMP D'ESSAIS

2. 1. — *Caractéristiques générales*

Implanté sur une luzernière n'ayant reçu aucun engrais depuis dix ans, le champ d'expériences est situé dans le fond du vallon du rû de Gally, sur un terrain très légèrement incliné vers le Nord. Son sol, de formation colluviale, présente une granulométrie comprise entre les limites suivantes (MOREL, RICHER et MASSON, 1956) :

Sable grossier.....	20 à 35	p. 1 000
Sable fin	400 à 440	—
Limon	210 à 260	—
Argile.....	220 à 300	—

[1] Le Centre de Grignon est situé à 30 km à l'ouest de Paris.

Les quelques caractéristiques générales ci-après complètent les indications précédentes :

— taux de calcaire : 25 à 100 p. 1 000,
— pH (eau) : 8 à 8,3
— éléments chimiques, selon les traitements (1972) :
- azote total (méthode Kjeldhal) : 1,03 à 1,51 p. 1 000,
- carbone organique (méthode Anne) : 9,5 à 14,8 p. 1 000,
- phosphore « assimilable » (méthode Joret-Hébert) 0,11 à 0,69 p. 1 000 (P_2O_5),
- potassium échangeable : 0,15 à 0,31 p. 1 000 (K_2O).

La roche sous-jacente calcaire se situe entre 0,70 m et 1 mètre au-dessous de la surface du sol.

L'environnement climatique du champ d'essais (période 1957-1974) se caractérise ainsi (Documents I.N.R.A., S.E.I., 1975) :

— pluviométrie annuelle : 642 mm,
— bilan hydrique (E.T.P.-P) :
- excédent hivernal (octobre-mars) : 179 mm,
- déficit estival : 235 mm.

— températures moyennes mensuelles :
- minimum : — 3,0°C (janvier 1963),
- maximum : + 25,5°C (juillet 1959),

— ensoleillement annuel moyen : 1 900 heures.

2. 2. — *Le dispositif expérimental*

Il comprend actuellement 77 parcelles de 1 are cultivées alternativement par demi-are en blé et en betteraves sucrières. Antérieurement à 1929, diverses rotations avaient été suivies. Par ailleurs, pendant quelques années, des carottes ont remplacé partiellement ou en totalité les betteraves en vue d'essais d'alimentation sur de petits animaux. Enfin, 20 nouvelles parcelles de 25 m² sont maintenues depuis 1964 sans culture et présentent les mêmes traitements. Ceux-ci se divisent en cinq groupes :

I. Parcelles sans engrais d'aucune sorte depuis 1875, 1902, 1931. Certaines des parcelles sans engrais depuis 1875 ont toujours été assolées ; d'autres, mises en place en 1965, étaient restées engazonnées jusqu'à cette date.

II. Parcelles recevant une fertilisation minérale NPK, depuis 1902 et 1967 ; pour ces dernières, la fumure a été appliquée sur des parcelles sans engrais depuis 1902.

III. Parcelles recevant une fertilisation minérale déséquilibrée depuis 1929 (soit sans azote, sans phosphore ou sans potassium).

IV. Parcelles recevant du fumier d'étable depuis 1929.

V. Parcelles recevant une fertilisation organique et minérale depuis 1964 ; les quantités totales d'azote, de phosphore et de potassium appliquées sont égales aux quantités de ces éléments incorporés dans les parcelles du groupe II ; la fumure organique (fumier) est la même que celle des parcelles du groupe IV (le fumier est analysé, ce qui permet de calculer chaque année le complément minéral à apporter).

Précisons que sur toutes les parcelles cultivées, les pailles de céréales et les verts de betteraves sont éliminés.

Les quantités d'éléments fertilisants apportés par are et par an sont les suivantes :

— fumier d'étable : 100 kg ;
— azote : 0,87 kg (nitrate d'ammonium) ;
— phosphore : 0,40 kg de P soit 0,90 kg de P_2O_5 (superphosphate minéral) ;
— potassium : 0,75 kg de K soit 0,90 kg de K_2O (chlorure de potassium).

Les quantités d'éléments minéraux (NPK) sont les mêmes que celles prescrites par DEHÉRAIN dès 1902 : il a semblé en effet raisonnable de conserver une fertilisation toujours identique afin de ne pas introduire de variable supplémentaire rendant plus difficile l'interprétation des résultats. Aussi, les fumures appliquées demeurent-elles inférieures à celles qui sont actuellement pratiquées en agriculture intensive ; ce fait explique un niveau de production très moyen des parcelles recevant une fertilisation minérale complète (NPK). Afin d'estimer la potentialité réelle de production du sol, de nouvelles parcelles hors dispositif mais voisines de celui-ci, ont été implantées en 1974 et reçoivent une fertilisation organique et minérale actualisée.

Les différents traitements sont répartis le long de 5 bandes parallèles identiques, un traitement étant généralement répété deux fois sur chacune des bandes. Les bandes A, B, C, D sont cultivées, la bande E demeure sans culture (fig. 1). Cette disposition ne répond pas aux exigences de la statistique dont les règles distributives parcellaires n'étaient pas élaborées à l'époque de l'implantation du dispositif.

		60	40	20	Sans engrais depuis 1875 G
	79	59	39	19	
98	78	58	38	18	Fumier + NPK depuis 1965
97	77	57	37	17	N P sans K depuis 1929
96	76	56	36	16	Sans engrais depuis 1931
95	75	55	35	15	Sans engrais depuis 1902
94	74	54	34	14	Sans engrais depuis 1931
93	73	53	33	13	P K sans N depuis 1929
92	72	52	32	12	N K sans P depuis 1929
91	71	51	31	11	NPK depuis 1967 sur sans engrais depuis 1902
90	70	50	30	10	N P K depuis 1902
89	69	49	29	9	N P sans K depuis 1929
88	68	48	28	8	P K sans N depuis 1929
87	67	47	27	7	N K sans P depuis 1929
86	66	46	26	6	Sans engrais depuis 1902
85	65	45	25	5	Sans engrais depuis 1875 A
84	64	44	24	4	Sans engrais depuis 1902
83	63	43	23	3	N P K depuis 1902
82	62	42	22	2	Fumier seul depuis 1929
31	61	41	21	1	Fumier seul depuis 1929
E	D	C	B	A	

FIG. 1. — *Plan du dispositif Dehérain*

Les variétés de blé et de betteraves sont actuellement *Champlein* et *Cerès*.

Jusqu'en 1971, la propreté des parcelles a pu être assurée sans trop de difficultés sans l'utilisation d'herbicides ; actuellement, leur emploi, le plus limité possible, se révèle nécessaire.

2. 3. — *Résultats expérimentaux*

Nous comparerons les résultats relatifs aux différents traitements du dispositif sous 4 titres :

— le sol,
— la production végétale,
— la composition et la qualité des produits végétaux,
— la qualité des récoltes et le développement des animaux.

En ce qui concerne le sol, nous ne traiterons dans cet article que les résultats concernant le phosphore. Les résultats et recherches relatifs à l'azote font l'objet d'un second mémoire.

3. — LE SOL

Étude sur le phosphore

Sous différentes modalités, l'utilisation de ^{32}P a ouvert une voie nouvelle d'exploration sur la dynamique du phosphore dans le sol. Récemment, FARDEAU a plus particulièrement mis au point une analyse de la fertilité phosphorique par la technique des cinétiques de dilution isotopique des ions phosphates dans les systèmes sol-solution de sol.

La quantité de ^{32}P isotopiquement échangée au cours du temps suit une relation qui peut être exprimée par l'équation suivante :

$$E_{(t)} = \frac{1}{r_{1/R}} \cdot p \cdot t^n$$

dans laquelle R est la radioactivité totale (^{32}P) introduite dans le système, r_1 la radioactivité restant en solution après une minute, p la quantité de ^{31}P de la solution à l'équilibre ; t est exprimé en minutes, n représentant un nombre compris entre 0 et 0,5.

Présentée sous forme logarithmique, cette relation s'écrit :

$$\log E_{(t)} = \log \frac{pR}{r_1} + n \log t$$

ou, si E_1 désigne la quantité de phosphore isotopiquement échangeable au temps $t = 1$:

$$\log E_{(t)} = E_1 + n \log t$$

$\log E_{(t)}$ apparaît ainsi comme une fonction linéaire de $\log t$, n représentant la pente.

Les valeurs $\frac{r_1}{R}$, p, n, ainsi que celles de $E_{(t)}$ reflètent les modifications apportées au sol. Ainsi, à condition que le pouvoir absorbant demeure constant, une addition de phosphore se traduit par un accroissement de $\frac{r_1}{R}$, de p et une diminution de n.

Cette approche de l'étude de la fertilité phosphorique a été appliquée aux sols de certaines des parcelles du dispositif Dehérain ; quelques-uns des résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 1 et représentés sur la figure 2.

Les remarques suivantes peuvent être faites :

— les parcelles sans apport de phosphore s'appauvrissent en phosphore isotopiquement échangeable entre 1938 et 1972 ;

— sur les parcelles sans apport de phosphore se remarquent nettement, entre 1938 et 1972, une diminution de $\frac{r_1}{R}$, de p, et une augmentation de n ;

— la figure 2 illustre les différences entre les niveaux du phosphore isotopiquement échangeable pour 3 parcelles de traitements variés ; la pente de la droite pour les parcelles sans engrais depuis 1875 est plus grande que dans les deux autres cas ;

— les parcelles recevant une fertilisation phosphatée s'enrichissent légèrement entre 1938 et 1972. Cependant, la rétrogradation s'est dans le même temps accrue

TABLEAU I

Cinétiques de dilution isotopique. Valeurs caractéristiques

Traitements	N° de parcelle	Date du prélèvement	$\frac{r_1}{R}$	p µg P p. 10 ml de solution	n	E_1 µg P p. g sol.	E_{100} µg P p. g sol.
			Parcelles avec apport de phosphore				
Fumure NPK depuis 1902	3	1938	0,330	4,05	0,198	12,10	30,50
Fumure NPK depuis 1902	43	1938	0,300	3,50	0,202	11,40	29,00
Fumure PK depuis 1929	48	1938	0,430	5,35	0,177	12,38	28,00
Fumure NPK depuis 1902	3	1972	0,280	4,70	0,197	16,90	42,60
Fumure NPK depuis 1902	43	1972	0,284	3,30	0,228	11,60	32,40
Fumure PK depuis 1929	48	1972	0,308	6,92	0,190	22,40	54,00
			Parcelles sans apport de phosphore				
Sans fumure depuis 1875	5	1938	0,240	0,57	0,280	2,39	8,68
Fumure NK depuis 1929	47	1938	0,420	2,18	0,202	6,74	17,00
Sans fumure depuis 1875	5	1972	0,140	0,21	0,299	1,51	5,96
Fumure NK depuis 1929	47	1972	0,180	0,24	0,333	1,32	6,17
			Parcelles ne recevant que du fumier d'étable				
Fumure au fumier d'étable depuis 1929	1	1938	0,410	3,37	0,201	8,40	20,20
Fumure au fumier d'étable depuis 1929	42	1938	0,430	4,50	0,201	10,51	28,50
Fumure au fumier d'étable depuis 1929	1	1972	0,306	2,65	0,252	8,81	26,50
Fumure au fumier d'étable depuis 1929	42	1972	0,342	2,62	0,212	7,82	20,87

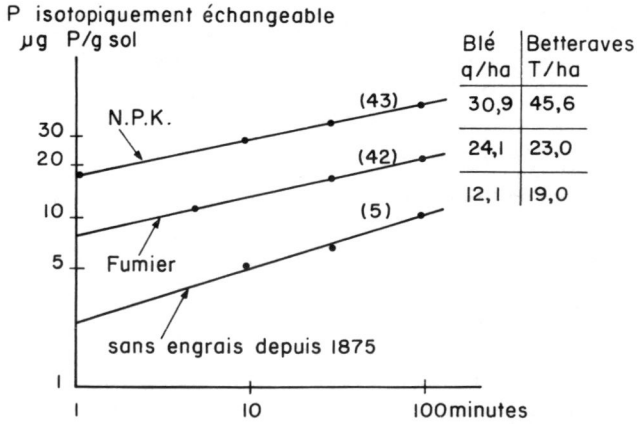


FIG. 2. — *Cinétique d'échange du phosphore* (coordonnées logarithmiques), année 1972
(5),(42),(43) = numéros des parcelles

de façon importante ; ce fait peut être observé en comparant l'accroissement de la teneur en phosphore minéral entre 1938 et 1972 à celui du phosphore isotopiquement échangeable en une minute par exemple : pour la parcelle n° 3, ces accroissements sont respectivement de 195 p.p.m. de P pour le premier (détermination de P après attaque perchlorique) et 4,8 p.p.m. de P pour le second. Ce taux de rétrogradation se révèle supérieur à ce qui est habituellement observé pour les sols de même type ; des observations faites sur de très nombreux essais concernant divers types de sols laissent penser que la variation du taux de matière organique au cours de l'expérience n'est pas étrangère à ce comportement. Cette variation est un facteur important susceptible d'infléchir la dynamique du phosphore dans les sols et plus particulièrement dans le cas d'essais de très longue durée.

4. — LA PRODUCTION VÉGÉTALE

Elle est indiquée dans le tableau 2 pour la période 1970-1975 (moyenne des six dernières années). Son évolution de 1931 à 1970 est représentée par moyennes décennales sur les figures 3 et 4.

TABLEAU 2

Moyenne des rendements de 1970 à 1975 (6 années)
(exprimés en quintaux/hectare)

Traitements	Blé				Betterave	
	Grains		Paille			
	Rendements	Indices	Rendements	Indices	Rendements	Indices
Sans engrais depuis 1875, A	11,9	36	12,8	33	110	31
Sans engrais depuis 1875, G	15,6	48	18,1	46	210	59
Sans engrais depuis 1902	12,3	37	14,3	36	141	39
Sans engrais depuis 1931	14,8	45	16,1	41	168	47
Fertilisation minérale NPK depuis 1902	32,8	100	39,3	100	358	100
Fertilisation minérale NPK depuis 1967 sur sans engrais depuis 1902	30,8	94	33,6	85	356	99
Fertilisation minérale NK sans P depuis 1929	29,7	91	35,0	89	169	47
Fertilisation minérale PK sans N depuis 1929	15,9	48	18,6	47	233	65
Fertilisation minérale NP sans K depuis 1929	22,2	68	24,1	61	242	68
Fumier seul depuis 1929	26,4	80	38,5	98	337	94
Fumier + NPK depuis 1964	30,1	92	39,7	101	358	100

A : Parcelles en rotation depuis 1875.
G : Parcelles engazonnées de 1875 à 1965.

Nous ferons un bref commentaire sur l'évolution des rendements puis examinerons la production obtenue pour les différents traitements dans les trois catégories suivantes :

— parcelles sans aucune fertilisation,
— parcelles recevant une fertilisation complète,
— parcelles recevant une fertilisation minérale déséquilibrée.

Nous compléterons ces informations par une étude particulière des parcelles du groupe II, fertilisées à nouveau depuis 1967.

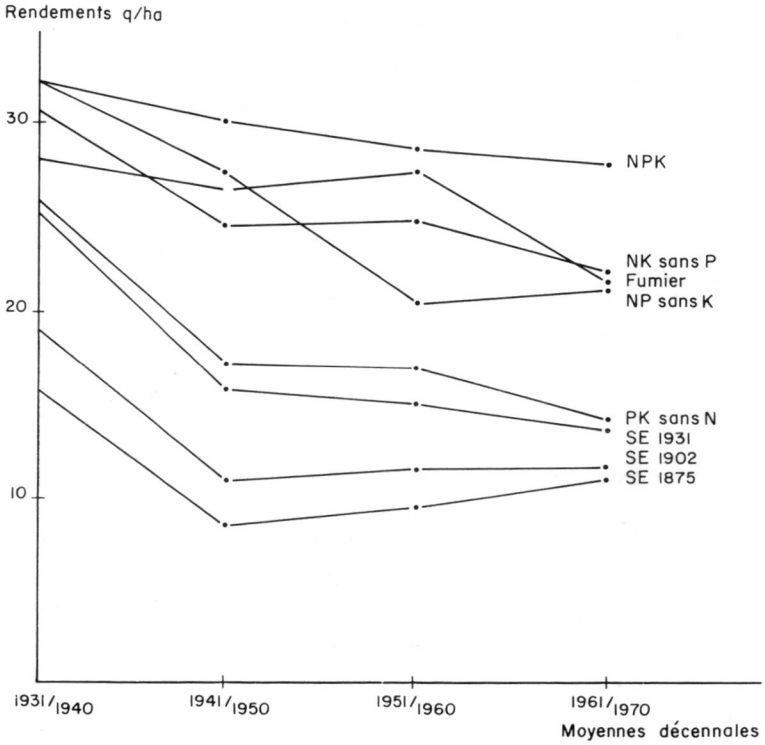


FIG. 3. — *Évolution des rendements en Blé* (grains) *de 1931 à 1970*

4. 1. — *Évolution des rendements de 1931 à 1970*

L'interprétation de l'évolution des rendements est marquée de plusieurs difficultés : d'une part les variétés successives utilisées sont des variétés commercialisées de plus en plus productives ; de plus, pour le blé s'ajoute l'emploi fréquent jusqu'en 1970 de variétés de printemps de rendement plus faible que celui des variétés d'hiver. D'autre part, depuis 1971, il s'est révélé nécessaire de faire usage d'herbicides pour assurer la propreté de la sole de céréales ; la production de blé en a été sans doute relevée.

Il est alors difficile de saisir, pour les différents types de traitements, l'influence sur la production de chacun de ces changements de variables, changements qu'il

n'a pas été possible d'éviter. Au cours de ces cinq dernières années, les rendements en blé ont une nette tendance à s'élever dans tous les traitements ; l'inverse est observé pour la betterave.

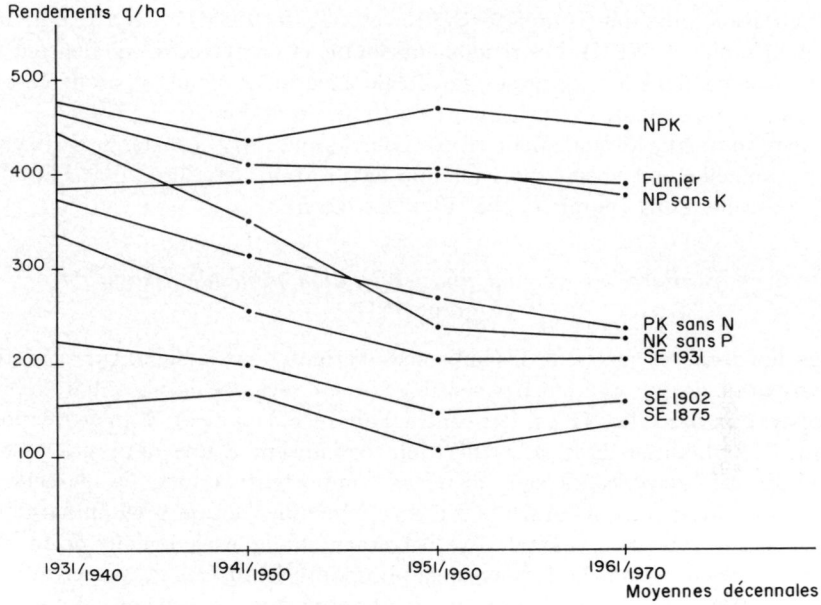


FIG. 4. — *Évolution des rendements en Betteraves de 1931 à 1970*

D'une façon générale, les productions évoluent en 2 groupes assez distincts, différents pour le blé et la betterave : (fig. 3 et 4) :

— pour la céréale, nous trouvons réunies les parcelles sans apport d'engrais et recevant une fumure sans azote d'une part, les autres parcelles d'autre part ;

— en ce qui concerne la betterave, le premier groupe s'enrichit des parcelles sans apport de phosphore et, au cours de ces dernières années, du traitement sans fertilisation potassique.

4. 2. — *Parcelles sans aucune fertilisation*

Les rendements en blé et en betteraves diminuent avec l'ancienneté des traitements. Les parcelles sans engrais depuis 1875 et 1902 ont des productions en blé voisines, se situant aux environs de 12 q/ha soit environ 2 fois et demi moins que celle des parcelles les plus productives du dispositif (fertilisation minérale NPK).

Notons que les parcelles demeurées sous gazon de 1875 à 1965 accusent une production très nettement supérieure à celle des parcelles assolées ; l'observation est surtout marquée pour la betterave (rendement voisin du double). Ces résultats sont à rapprocher de la richesse du sol en azote organique : 1,30 p. 1 000 pour les premières parcelles, 1,06 pour les secondes (année 1972).

4. 3. — *Parcelles recevant une fertilisation complète* (groupes II, IV et V)

Les productions les plus élevées sont celles des parcelles du dispositif recevant une fertilisation minérale complète (NPK) et une fertilisation mixte minérale et organique (fumier + NPK). Les rendements en blé et en betterave demeurent toutefois assez voisins dans les 3 groupes, la céréale accusant cependant un fléchissement sur les parcelles recevant exclusivement du fumier d'étable.

A titre indicatif, le rendement en blé pour l'année 1975 est de 49,1 q/ha sur les parcelles nouvellement créées recevant une fertilisation actualisée (parcelles NPK : 34,7 q ; parcelles sans engrais depuis 1875 A : 9,0 q).

4. 4. — *Parcelles recevant une fertilisation minérale déséquilibrée* (groupe III)

Les déséquilibres suscitent des influences distinctes sur le blé et sur la betterave. Le blé apparaît jusqu'à présent peu sensible à une déficience en phosphore (indice 90 par rapport aux parcelles NPK). Par contre, l'absence d'azote et, à un degré moindre, le défaut de potassium dans la fertilisation, conduisent à une diminution sérieuse du rendement ; les parcelles sans azote se comportent comme les parcelles sans engrais depuis 1931, ce qui confirme, s'il en est besoin, l'action prédominante de cet élément sur la croissance végétale. La betterave souligne également de façon très marquée les déséquilibres, la déficience en phosphore étant très gravement ressentie. La carence en potassium paraît plus aisément supportée, ce comportement pouvant être lié à deux causes. En premier lieu, l'alimentation potassique de la plante demeure relativement satisfaisante : bien que ce critère analytique soit discutable, mentionnons que le taux de potassium échangeable du sol est de 108 p.p.m. pour les parcelles « NP », de 136 p.p.m. pour les parcelles « NPK ». En second lieu, il ne semble pas impossible que se manifeste une action vicariante du sodium : le sol se révèle en effet enrichi en cet élément du fait de l'utilisation de nitrate de sodium comme engrais azoté pendant de très nombreuses années (60 p.p.m. Na échangeable dans les parcelles « NP », 25 p.p.m. dans les parcelles « PK ») et malgré une faible rétention par le complexe absorbant.

4. 5. — *Effet d'une fumure minérale complète* (NPK) *sur un sol non fertilisé depuis 1902* (groupe II)

La décision, prise en 1967, d'apporter à nouveau une fumure minérale sur des parcelles n'ayant reçu aucun engrais depuis 1902 avait pour objet l'étude des conséquences de cette modification de traitement sur la matière organique du sol. Il s'agit là d'une action à long terme dont l'étude n'est pas encore abordée. Par contre, l'incidence de ce nouvel apport d'éléments fertilisants sur la production s'est rapidement révélée riche d'intérêt. Précisons que les 4 parcelles concernées par ce traitement jouxtent 4 parcelles ayant reçu depuis 1902 une fertilisation minérale complète (NPK) (voir fig. 1).

Les figures 5 et 6 représentent l'évolution des rendements en blé et en betterave au cours des années qui ont suivi le début du traitement. Le comportement des

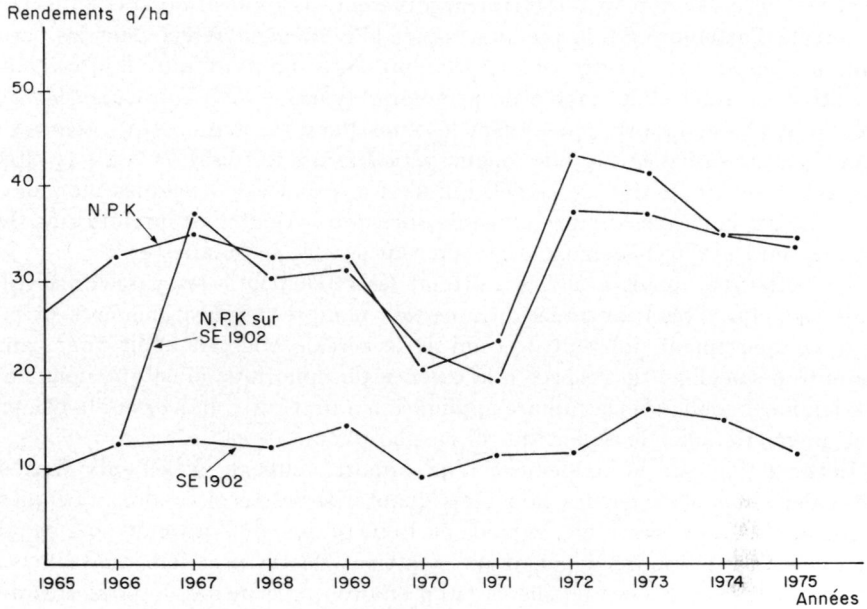


FIG. 5. — *Évolution des rendements en Blé après reprise de fertilisation*

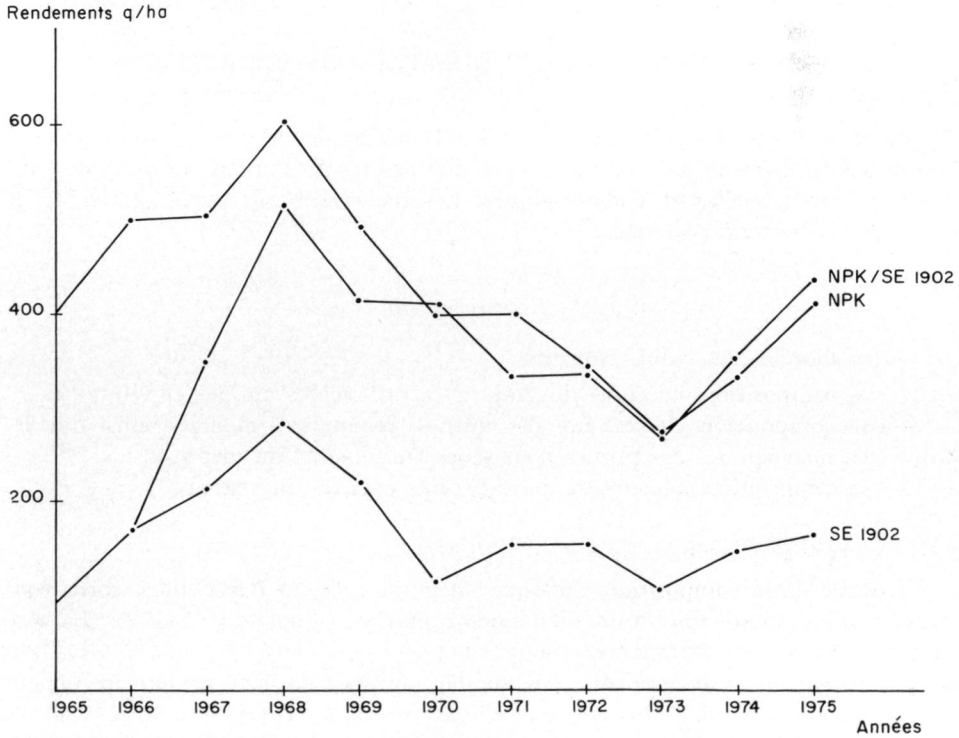


FIG. 6. — *Évolution des rendements en Betteraves après reprise de fertilisation*

2 espèces cultivées apparaît légèrement différent. L'application d'engrais permet à la céréale d'atteindre dès la première année le rendement relevé dans les parcelles fertilisées depuis 1902 ; cette observation présente d'autant plus d'intérêt que le blé cultivé en 1967 était un blé de printemps (variété *Rex*) sur lequel la fumure minérale avait été apportée peu avant le semis (mois de mars). Ainsi, dans le type de sol du dispositif d'essais, une longue période sans fertilisation n'a pas altéré la potentialité de production de ce sol, qui s'est exprimée en quelques mois dès lors qu'il a été appliqué une fumure minérale suffisante. Ajoutons toutefois que, depuis deux ans, un léger fléchissement du rendement semble se manifester.

La betterave, quant à elle, n'a atteint les rendements des parcelles fertilisées depuis 1902, qu'après trois années. Un certain nombre d'indications laissent penser que ce comportement différent de celui de la céréale pourrait avoir pour cause la sensibilité particulière de l'espèce à la carence phosphorique ainsi que nous l'avons précédemment soulignée : la fumure appliquée n'aurait pu, comme pour le blé, pallier dès la première année le déficit du sol en phosphore.

Cette action sur le rendement d'un apport nouveau d'éléments fertilisants s'est également reflétée sur les caractères qualitatifs des récoltes, dont quelques-uns ont été suivis. Ainsi, sur le blé, le poids de 1 000 grains, de l'ordre de 30 à 35 g pour les parcelles sans fumure depuis 1902, a atteint dès la première année la valeur observée pour les parcelles fertilisées (40 g environ). De même, le taux d'azote des grains s'est également relevé (de 1,8 à 2,1 p. 100 environ).

5. — COMPOSITION ET QUALITÉ DES VÉGÉTAUX

La nature des traitements du dispositif Dehérain devait permettre de préciser l'influence de la fertilisation sur la composition des récoltes et sur certaines de leurs qualités nutritionnelles et technologiques. Les recherches ont porté sur le blé, la carotte et la betterave sucrière.

5. 1. — *Recherches sur le blé*

Elles abordent les points suivants :

— la composition chimique du grain en azote, acides aminés et vitamines ;

— la composition élémentaire des farines, remoulages et sons, ainsi que les propriétés rhéologiques des farines pour 5 des traitements du dispositif ;

— la composition élémentaire des différents organes du végétal.

5.1.1. *Composition chimique du grain.*

L'étude de la composition chimique du grain entier a fait l'objet, entre 1961 et 1964, d'un travail important dont nous rapportons quelques résultats (Bazier, Guérillot-Vinet et Guérillot, 1966).

La teneur en azote total du grain semble marquer un léger fléchissement pour les récoltes des parcelles sans engrais ; elle est pratiquement identique pour le blé recevant une fertilisation minérale complète NPK et du fumier d'étable ; elle paraît

TABLEAU 3

Teneurs du grain de blé en azote total

Traitement	Récolte 1961 Variété *Cappelle*		Récolte 1962 Variété *Heurtebise*	
	N p. 1 000 de MS	Indice de comparaison (NPK = 100)	N p. 1 000 de MS	Indice de comparaison
Sans engrais depuis 1875	15,6	94	18,5	88
Sans engrais depuis 1902	15,5	94	18,8	90
Sans engrais depuis 1931	16,0	97	18,6	89
Fertilisation minérale NPK	16,5	100	20,9	100
Fumier d'étable	16,6	101	20,2	97
Fertilisation minérale PK	16,0	97	17,1	82
Fertilisation minérale NK	19,3	117	21,7	104
Fertilisation minérale NP	19,8	120	23,0	110

TABLEAU 4

Composition du grain (blé) *en acides aminés*

(grammes d'acides aminés pour 16 grammes d'azote)
Récolte 1962 : variété *Heurtebise*

	Sans engrais depuis 1902	NPK depuis 1902	Fumier d'étable	NK depuis 1929	NP depuis 1929	PK depuis 1929
Acide aspartique	5,3	5,0	5,1	5,1	5,4	5,5
Thréonine	2,6	3,0	2,8	2,8	3,1	3,1
Sérine	4,4	4,6	4,5	4,5	4,6	4,7
Acide glutamique	27,3	26,9	27,5	29,2	28,4	27,1
Proline	9,6	8,7	8,7	9,6	9,4	9,5
Glycine	3,9	3,8	3,9	3,9	4,1	4,1
Alanine	3,5	3,5	3,5	3,8	3,8	3,7
Valine	4,7	4,3	4,5	4,6	5,5	4,7
Méthionine	1,7	1,7	1,8	1,8	1,6	1,5
Isoleucine	3,7	3,6	3,9	3,7	3,6	3,6
Leucine	6,6	6,5	6,3	7,5	6,6	6,9
Tyrosine	2,7	3,2	2,8	2,8	2,7	2,6
Phénylalanine	4,2	4,6	4,4	4,5	4,4	4,2
Lysine	3,0	2,5	2,6	2,6	2,8	2,9
Histidine	2,2	2,0	2,0	2,0	2,3	2,1
Arginine	4,5	3,7	4,3	3,8	4,0	3,9
Cystine	2,9	2,8	2,7	2,8	2,9	3,9

augmenter lorsque le phosphore et le potassium sont absents de la fumure. Les variations d'origines climatique ou variétale sont très supérieures aux variations causées par la différence des traitements du sol (tabl. 3).

Les acides aminés ont été déterminés pour les variétés *Cappelle* et *Heurtebise*, cultivées en 1961 et 1962. Les quantités trouvées, rapportées à l'azote, sont indiquées pour la variété *Cappelle* et pour 5 des traitements dans le tableau 4. Les teneurs sont très voisines pour les différents traitements du sol et pour les 2 variétés.

Par ailleurs, des dosages de tocophérols totaux dans le grain entier et dans les germes n'ont montré aucune différence significative entre les récoltes des parcelles sans engrais, avec fumier et recevant une fertilisation minérale NPK (tabl. 5).

TABLEAU 5

Tocophérols totaux dans le grain entier
(µg/g de matière sèche)

	NPK depuis 1902	Sans engrais depuis 1902	Fumier depuis 1929
Blé entier	74,1	77,0	81,0
Germes	53,0	51,0	53,0

5.1.2. *Composition et qualités des fractions technologiques du grain.*

Différentes déterminations ont porté sur les farines, remoulages et sons correspondant, pour les traitements suivants, à la récolte 1974 (variété *Champlein*) : sans engrais depuis 1902, fertilisation minérale NPK, fumure au fumier d'étable, fertilisations minérales NP et PK (tabl. 6 et 7).

Les pourcentages des trois fractions obtenues à la mouture (moulin Bühler semi-industriel) sont très voisins pour tous les traitements.

D'une façon générale, les taux de P, K, Mg, Mn paraissent indépendants du traitement. Le taux de Ca est nettement plus élevé pour une fertilisation minérale sans potassium dans les remoulages et les sons. L'observation la plus marquée concerne le zinc, dont le taux le plus élevé s'observe lorsque la fertilisation est déficiente en azote : parcelles P K sans azote et, à un degré moindre, parcelles sans engrais ou ne recevant que du fumier.

Les tests rhéologiques donnent pour les échantillons des 5 traitements les indices d'une mauvaise valeur boulangère inhérents à la variété. Il apparaît toutefois une différence pour la farine issue du blé des parcelles sans fertilisation potassique : l'alvéogramme accuse à la fois une nette diminution de la tenacité et une augmentation de l'extensibilité ; ce résultat traduit vraisemblablement la présence de protéines de mauvaise qualité, fait dont l'origine peut tenir au déséquilibre de la fertilisation (Godon, 1975).

En conclusion des 2 groupes d'études précédents, il ressort que le grain de blé demeure peu sensible à l'action de différents traitements du sol qui a porté la culture.

TABLEAU 6. — *Analyse des farines, remoulages et sons* (B. GODON, 1975)

Traitements	Farine					Remoulages					Sons				
	Ca mg/g	Mg mg/g	Mn p.p.m.	Zn p.p.m.	Cu p.p.m.	Ca mg/g	Mg mg/g	Mn p.p.m.	Zn p.p.m.	Cu p.p.m.	Ca mg/g	Mg mg/g	Mn p.p.m.	Zn p.p.m.	Cu p.p.m.
Sans engrais depuis 1902	0,4	0,13	5,8	10,0	2,2	1,2	2,1	169	85	3,2	1,6	4,4	180	100	4,0
NPK depuis 1902	0,4	0,13	4,3	4,8	1,3	1,3	2,1	163	66	2,6	1,5	4,1	168	73	3,0
Fumier depuis 1929	0,4	0,13	6,1	6,5	2,4	1,2	2,3	181	90	2,4	1,4	4,6	184	100	3,3
PK depuis 1929	0,4	0,15	5,7	19,5	2,0	1,3	2,5	186	101	2,7	1,4	4,7	173	113	2,8
NP depuis 1929	0,5	0,15	6,0	6,3	2,0	2,0	2,4	182	76	2,6	2,3	4,8	192	80	3,2

TABLEAU 7. — *Qualités technologiques du blé* (B. GODON, 1975)

Traitements	Pourcentage des fractions obtenues			Tests rhéologiques					
				Alvéogramme				Farinogramme	
				Déformation d'une lame de pâte sous la pression de l'air (= bulle)					
	Farine	Remoulage	Sons	W travail	P pression maximum supportée	G élongation maximum	P/L rapport ténacité/ extensibilité	Teneur en eau acceptée au pétrissage	Relâchement de la pâte après 12 mm en unités arbitraires
Sans engrais depuis 1902 ..	73,2	7,2	19,5	76	27	22,6	0,26	46,0	180
N P K depuis 1902.....	71,4	8,5	20,0	96	31	24,1	0,26	46,4	180
Fumier depuis 1929	73,1	7,3	19,5	95	31	23,0	0,29	46,0	180
Fumure PK sans N	73,2	7,4	19,3	79	29	22,4	0,30	46,6	180
Fumure NP sans K	71,8	7,8	20,3	75	24	29,1	0,13	46,0	180

En particulier, les tests analytiques utilisés ne permettent pas de faire de distinction entre les effets de fertilisations minérales ou organiques. Les variations les plus nettes, bien que toujours peu accusées, concernent les parcelles déséquilibrées dans lesquelles, depuis 1929, l'un des éléments N, P ou K a été supprimé de la fumure ; parmi ces 3 types de carences, il semble que ce soit l'absence de potassium qui se révèle avoir le plus d'incidence sur les tests observés.

5.1.3. *Composition élémentaire des différents organes de la plante.*

En ce qui concerne la composition élémentaire des différents organes du blé, des analyses de N, P, K, Ca, Na ont été effectuées en 1965 sur la récolte de blé de la bande B (variété *Cappelle*) pour les organes suivants : racines, tiges, gaines, limbes, rachis, glumes et grains. Les taux de ces divers éléments chimiques, les exportations des différents organes, la relation avec la teneur des éléments dans le sol offrent un ensemble de résultats dont nous rapportons ici quelques exemples. Précisons que l'analyse des racines n'intéresse que la partie de celles-ci qui a pu être séparée du sol par un arrachage soigneux de la plante ; les fines radicelles ne sont donc pas concernées, les résultats trouvés donnant cependant des indications comparatives.

Les valeurs moyennes présentées sont entachées de l'erreur relative à un nombre très limité de répétitions (2 en général). Cependant, pour N, P et K, les taux trouvés pour chacune de ces répétitions sont souvent très voisins, surtout dans le cas des grains ; les écarts apparaissent plus grands pour le calcium et surtout pour le sodium.

Les résultats relatifs à N, P et K font ressortir la distinction majeure qui existe pour les différents organes entre l'azote et le phosphore d'une part, le potassium d'autre part : (tabl. 8). Pour les 2 premiers éléments, la teneur du grain domine largement celle des autres organes ; c'est l'inverse pour le potassium qui, par contre et quel que soit le traitement, présente dans le grain un taux relativement constant.

En ce qui concerne l'azote et le phosphore, le déséquilibre de la fertilisation a une incidence nettement plus marquée sur tous les organes qu'une déficience générale du sol telle qu'elle s'est progressivement établie sur les parcelles sans aucune fumure. L'observation vaut en particulier pour P sur la récolte du traitement NK ; elle apparaît sans équivoque pour l'azote sur les blés sans engrais et sans apport d'azote. Notons aussi la teneur moindre en azote de tous les organes, sauf les grains, dans le cas du traitement au fumier d'étable comparé au traitement NPK.

L'effet d'une fertilisation sans potassium est plus nuancée : celle-ci est pratiquement sans effet sur la teneur en potassium des grains, des glumes et des rachis.

Les teneurs en N, P et K des gaines et des limbes révèlent des particularités curieuses ; peu différentes pour le phosphore elles varient souvent du simple au double dans l'ensemble des traitements pour l'azote et le potassium, mais en s'inversant : les gaines sont plus riches en potassium et les limbes en azote.

Les taux de potassium des tiges et des racines, pour les différents traitements, présentent une variation parallèle à la teneur du sol en potassium échangeable ; il n'en est pas de même pour les autres organes. Les teneurs en phosphore « assimilable » du sol (méthode Joret-Hébert), par contre, ne sont pas reflétées dans les variations du taux de l'élément dans un organe particulier de la plante.

TABLEAU 8

Poids par hectare et composition des différents organes du Blé
(récolte 1965)

Traitements Organes	Rendements par ha Parties aériennes Différents organes	Azote p. 1 000 de MS	Phosphore p. 1 000 de MS	Potassium p. 1 000 de MS	Calcium p. 1 000 de MS	Sodium p. 1 000 de MS
S E depuis 1902	42,6					
Racines	2,5	4,6	1,1	5,4	8,4	0,4
Tiges	14,9	2,9	0,6	5,9	2,4	0,1
Limbes	5,5	5,8	1,0	4,1	17,7	0,1
Gaines	6,4	3,8	1,8	8,1	7,5	0,1
Rachis	1,1	5,5	1,7	11,3	2,1	0,2
Grains	10,6	19,2	4,3	5,0	1,1	0,1
Glumes	4,1	6,4	1,9	7,3	2,1	0,2
NPK depuis 1902	113,5					
Racines	6,8	4,9	1,1	6,1	10,7	1,6
Tiges	45,4	3,3	0,5	8,1	3,0	0,4
Limbes	11,3	8,9	1,0	6,5	20,0	0,2
Gaines	15,0	5,0	0,8	13,7	8,2	0,2
Rachis	2,9	6,4	1,8	11,1	2,0	0,2
Grains	29,4	22,3	4,1	4,5	1,1	0,1
Glumes	9,4	7,3	1,6	6,9	1,8	0,2
PK sans N depuis 1929	37,3					
Racines	2,4	4,5	1,5	8,0	7,6	0,2
Tiges	12,9	2,3	0,5	9,7	2,4	0,2
Limbes	4,0	5,1	1,5	5,0	12,1	0,1
Gaines	5,2	3,3	1,4	11,3	5,8	0,1
Rachis	0,9	4,8	2,0	11,1	1,9	0,2
Grains	10,6	18,0	4,4	4,9	1,0	0,1
Glumes	3,6	5,9	2,1	7,7	2,0	0,2
Fumier seul depuis 1929	79,4					
Racines	5,1	4,0	1,2	7,5	14,2	0,3
Tiges	32,2	2,8	0,7	9,3	2,5	0,5
Limbes	8,1	7,6	1,3	6,8	15,1	0,1
Gaines	10,1	3,8	1,1	15,8	5,9	0,1
Rachis	1,8	6,0	2,2	11,0	1,7	0,2
Grains	20,3	22,3	4,4	4,7	1,0	0,1
Glumes	6,8	7,0	1,8	6,2	1,6	0,2
NK sans P depuis 1929	77,3					
Racines	4,3	6,1	0,8	6,5	7,6	1,5
Tiges	28,0	3,5	0,3	9,2	2,3	0,3
Limbes	8,3	9,3	0,5	6,7	12,8	0,2
Gaines	10,8	5,1	0,4	14,8	6,0	0,1
Rachis	2,1	6,7	0,8	14,4	1,9	0,2
Grains	20,8	25,0	3,2	4,6	1,0	0,1
Glumes	7,3	7,5	1,1	8,3	1,5	0,2
NP sans K depuis 1929	109,3					
Racines	6,5	5,6	1,2	3,4	11,5	1,5
Tiges	41,0	4,1	0,5	5,2	2,7	0,7
Limbes	10,6	10,9	1,2	4,1	26,0	0,2
Gaines	14,4	6,0	0,8	7,6	9,0	0,3
Rachis	3,1	6,9	1,3	12,0	2,8	0,2
Grains	30,2	22,1	3,6	4,7	1,4	0,1
Glumes	9,8	7,9	1,5	7,6	2,6	0,2

Un autre aspect des résultats obtenus concerne les proportions des éléments exportés par chacun des organes analysés. Le tableau 9 se rapporte à l'azote. Nous y relevons que le grain contient environ 60 p. 100 de l'azote total de la plante ;

TABLEAU 9

Taux des exportations d'azote par les différents organes du blé

Traitements du sol	Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Rachis	Glumes	Grains
Sans fumure depuis 1902	3,4	12,8	7,0	9,3	1,9	7,8	57,8
Fumure NPK depuis 1902	3,1	13,6	6,9	9,1	1,7	6,2	59,4
Fumure sans azote (PK) depuis 1929	3,7	10,4	5,8	7,0	1,5	7,4	64,1
Fumure sans phosphore (NK) depuis 1929	3,2	11,8	6,7	9,2	1,7	6,7	60,7
Fumure sans potassium (NP) depuis 1929	3,2	14,4	7,4	9,8	1,8	6,6	56,9
Fumure au fumier d'étable depuis 1929	2,9	12,5	5,5	8,7	1,5	6,7	62,3

avec un pourcentage beaucoup plus faible se place ensuite la tige (13 p. 100) puis les autres organes. Notons aussi, entre autres observations, que les traitements exclusifs aux engrais minéraux ou au fumier de ferme conduisent à des répartitions très voisines. Le tableau 10 donne, pour les parcelles recevant une fumure minérale NPK, les proportions des éléments chimiques décelées dans les différents organes ; environ 60 p. 100 de l'azote et du phosphore se retrouvent dans les grains ; par contre, le potassium et plus encore le calcium et le sodium sont principalement exportés par les organes végétatifs ; remarquons que les racines et les tiges contiennent près de 80 p. 100 du sodium ; notons aussi la disproportion des quantités de potassium des gaines et des limbes.

TABLEAU 10

Taux d'exportation de différents éléments par les organes du blé
(parcelles recevant une fertilisation minérale NPK)

Éléments	Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Rachis	Glumes	Grains
Azote	3,1	13,6	6,9	9,1	1,7	6,2	59,4
Phosphore	3,4	11,3	6,3	5,9	2,6	7,9	62,6
Potassium	4,6	40,1	22,5	8,0	3,5	7,1	14,2
Calcium	13,7	24,5	22,2	30,2	1,1	3,1	5,2
Sodium	30,0	46,1	6,9	4,8	1,8	4,0	6,5

5. 2. — *Recherches sur les carottes* (BAZIER *et al.*, 1966)

L'action des différents traitements sur les racines de carottes, de même que sur les organes végétatifs du blé, se reflète de façon plus accusée que sur le grain de la céréale. L'effet d'une déficience en azote (parcelles sans fumure, sans azote ou bien fertilisées au fumier d'étable) est particulièrement marqué sur le taux d'azote total d'une part, sur les proportions de glutamine et d'arginine d'autre part (tabl. 11). L'absence de potassium dans la fumure augmente nettement le taux d'azote total et la proportion de glutamine.

TABLEAU 11

Acides aminés et amides libres de la racine de carotte
(en moles de l'acide pour 100 moles d'acides aminés libres totaux)

	Sans engrais depuis 1902	N P K	Fumier	N K	N P	P K
Acide aspartique	13,1	11,2	13,9	12,2	10,5	12,6
Asparagine	19,2	18,8	22,6	20,1	18,7	14,9
Thréonine	3,2	3,0	3,0	3,6	2,7	3,0
Sérine	7,3	4,8	5,6	7,8	4,1	6,4
Acide glutamique	13,7	12,0	11,6	13,9	12,9	17,0
Glutamine	10,0	15,3	10,8	13,2	19,9	7,8
Glycine	0,8	0,4	0,5	0,4	0,4	0,7
Alanine	16,6	18,1	18,3	14,8	14,7	23,2
Valine	4,4	4,3	4,2	3,6	4,5	4,6
Méthionine	0,3	0,3	0,5	0,3	0,7	0,3
Isoleucine	2,5	2,4	2,4	2,2	2,4	2,6
Leucine	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	1,4
Tyrosine	1,3	0,9	1,0	0,8	0,6	1,4
Phénylalanine	1,2	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2
Lysine	0,7	0,3	0,5	0,5	0,4	0,7
Histidine	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6
Arginine	2,6	4,9	1,9	3,6	4,8	1,6

5. 3. — *Recherches sur les betteraves sucrières*

Celles-ci furent plus particulièrement abordées, avec le concours de l'Institut technique de la betterave, au cours des années 1972, 1973 et 1974 ; diverses déterminations concernant les qualités technologiques de la racine complétèrent les mesures habituelles. Les mêmes traits caractéristiques se reproduisent pour les 3 campagnes et nous donnons à titre d'exemple un extrait des résultats obtenus en 1972 (CHABOUIS, 1975) (tabl. 12).

Nous retrouvons pour la betterave l'action majeure des déséquilibres dans la fertilisation, effet déjà observé sur le blé et sur la carotte. Les rendements sont, rappellons-le, sérieusement affectés, les plus gravement compromis étant ceux des

TABLEAU 12

Influence du traitement sur la qualité technologique de la betterave sucrière (1972)

Traitements	Racines t/ha	Rapport feuilles/racines	Richesse en sucre (p. 100)	Milliéquivalents pour 100 g de sucre							Pureté des jus
				P (pulpes)	N (pulpes)	N soluble aminé (jus)	K (pulpes)	K (jus)	Na (pulpes)	Na (jus)	
Sans engrais depuis 1875	11,5	0,5	16,7	2,7	50,7	6,9	23,2	20,0	1,9	2,6	95,3
Sans engrais depuis 1965	21,2	0,4	17,2	4,3	43,9	4,2	23,9	19,6	1,6	1,9	96,0
NK depuis 1929	13,2	0,8	16,0	2,6	80,3	15,8	25,6	28,3	3,8	4,7	92,7
NP depuis 1929.....	21,6	0,7	15,2	5,5	67,7	9,0	19,3	15,1	4,6	5,9	95,3
PK depuis 1929	21,2	0,4	17,6	5,0	41,2	3,9	22,6	19,6	1,7	2,2	95,7
NPK depuis 1902	30,2	0,5	16,8	4,7	51,6	7,2	20,2	18,5	2,7	3,7	95,3
Fumier depuis 1929	30,8	0,5	16,3	5,2	52,1	7,1	25,1	22,2	2,6	3,7	94,9
Fumier + NPK depuis 1964	37,5	0,3	17,9	4,5	48,3	4,5	21,6	19,0	1,8	2,3	95,8

parcelles sans apport de phosphore. Les taux de sucre demeurent cependant assez voisins dans l'ensemble des parcelles, une légère diminution se remarquant toutefois pour les parcelles sans phosphore et sans potassium. Mais les différences les plus spectaculaires se manifestent dans les qualités technologiques des racines pour les parcelles sans phosphore et, à un degré beaucoup moindre pour les parcelles sans potassium. Dans les premières, le taux des « substances nuisibles » (amines, ions potassium...) est beaucoup plus élevé que pour les autres traitements : la quantité d'azote aminé par milliéquivalent de sucre avoisine le double de celle observée pour les parcelles « NPK » ; la proportion de potassium demeure également très supérieure ; il en résulte un abaissement marqué de la pureté des jus ; la reproductibilité de ces observations au cours des trois années ne laisse aucun doute sur le rôle éminent du phosphore dans le métabolisme normal de la plante.

Nous noterons également qu'aucune différence sensible ne distingue les parcelles exclusivement fertilisées avec des engrais minéraux NPK de celles recevant une fumure organique au fumier d'étable.

6. — INFLUENCE DE LA QUALITÉ DES RÉCOLTES SUR LE DÉVELOPPEMENT DES ANIMAUX

Nous rapportons ici les conclusions de travaux effectués par le laboratoire de biochimie du Centre de Grignon (Mme A. GUÉRILLOT-VINET, J. GUÉRILLOT, R. BAZIER, Mlle MANSUY). Ces recherches furent entreprises pour tenter de donner des éléments de réponse à la question suivante : l'emploi des engrais chimiques est-il susceptible de modifier la composition des végétaux de façon telle qu'elle puisse perturber l'équilibre nutritionnel normal d'un mammifère et, en conséquence, influer sur son état sanitaire ?

Le caractère d'ancienneté des traitements du dispositif Dehérain pouvait suggérer des expériences sur de petits animaux exclusivement nourris avec les produits des parcelles et attentivement suivis au cours de leur existence. Cette expérience a été effectivement réalisée pendant plusieurs années sur des générations successives de souris alimentées en blé et carottes provenant de 3 groupes de parcelles (GUÉRILLOT-VINET *et al.*, 1961) :

— parcelles sans aucune fertilisation depuis 1902 ;
— parcelles recevant depuis 1902 une fertilisation exclusivement minérale ;
— parcelles fertilisées uniquement au fumier d'étable depuis 1929.

Deux conclusions se sont dégagées de cette étude.

— Aucun effet néfaste ne s'est manifesté sur les souris par ingestion d'aliments en provenance des parcelles fertilisées aux engrais chimiques courants, sans aucune fumure organique.

— Un fait inattendu a été observé : l'action défavorable sur le taux de fécondité des animaux des aliments en provenance des parcelles fertilisées au fumier d'étable.

CONCLUSIONS

Les résultats que nous apportons dans ce mémoire, ainsi que dans celui traitant plus spécialement de l'évolution de la quantité d'azote organique du sol, portent témoignage de l'intérêt qui s'attache à la création et à l'entretien de champs d'essais de très longue durée.

Leur ancienneté leur confère une valeur exceptionnelle pour toute recherche de caractère fondamental concernant le sol et les végétaux ; elle offre, en premier lieu, le facteur expérimental indispensable à l'étude de cinétiques particulièrement lentes comme, par exemple, l'évolution quantitative de la matière organique du sol ; en second lieu, du fait des modifications qui affectent de façon cumulative le chimisme propre du sol, cette ancienneté conduit au fil des ans à une diversification de plus en plus prononcée entre chacun des traitements appliqués. Les différences s'observent sous de multiples aspects : structure, éléments minéraux, substances organiques, transferts internes, micropopulation, faune... pour ce qui concerne le sol ; rendements, composition, qualités, ultrastructures, métabolismes, parasitismes... quant aux traits caractéristiques du développement végétal ; leur ampleur est souvent telle qu'elle excède très largement l'erreur d'hétérogénéité propre du sol et l'erreur expérimentale, avantage présentant pour toute recherche comparative une sécurité qui ne saurait être atteinte dans une expérimentation à court ou à moyen terme. De plus, et nous soulignons ce point essentiel, cette diversité est obtenue dans les conditions naturelles de la production végétale, sur le même type de sol et sous le même microclimat : cela permet, pour de nombreux thèmes de recherches, d'éliminer implicitement les variables de caractère pédoclimatique. Ces essais peuvent dès lors offrir pour les végétaux une très opportune complémentarité des expériences poursuivies dans des conditions mieux connues et parfaitement maîtrisées (cultures artificielles).

Mais nous devons également reconnaître que de tels dispositifs posent de nombreux problèmes qui n'expriment souvent que la contrepartie de leurs avantages. L'un des inconvénients majeurs demeure en effet la pérennité d'un même traitement sur une même parcelle : les conditions de ce traitement peuvent devenir inactuelles ou de plus en plus difficiles à maintenir ; il en résulte des changements qui sont autant de modifications des variables initiales, rendant plus aléatoires les interprétations des résultats expérimentaux. Donnons des exemples qui reflètent quelques-unes de nos propres difficultés : la fertilisation minérale, sans modification depuis 1902, apparaît faible en regard du niveau actuel de la production végétale ; les variétés initialement cultivées, qui ne sont plus multipliées et commercialisées, sont remplacées par des variétés nouvelles plus productives ; la propreté des parcelles devient, sous céréale, de plus en plus difficile à assurer, ce qui engage à l'utilisation de produits herbicides. Certaines de ces difficultés peuvent être résolues par une implantation initiale de parcelles suffisamment grandes, susceptibles d'être ultérieurement divisées pour accueillir des modifications tout en préservant le traitement d'origine.

Un inconvénient d'un tout autre ordre tient à ce que les résultats expérimentaux

ne sont acquis avec sécurité qu'après une longue période nécessitant cependant des frais d'entretien permanents.

Il demeure néanmoins que, malgré d'inévitables imperfections inhérentes à tout dispositif expérimental, les champs d'essais de longue durée offrent des moyens d'investigations originaux, souvent irremplaçables, pour des études fondamentales sur le sol, le végétal et le complexe sol-plante.

Reçu pour publication en septembre 1976.

SUMMARY

SOME EXPERIMENTAL RESULTS OBTAINED ON DEHERAIN'S FIELD

The Deherain's long-term experimental system introduced in 1875 includes plots without any fertilization and plots with organic, mineral or even private supply of one of the nutritive elements N, P or K. The experimental results concern soil, plants and an experiment on little animals fed with the crops obtained.

Among the studies on soil, one concerns nitrogen and another one phosphorus ; the first one is dealt with in a special paper. The second one bears on the evolution of phosphorus exchangeability tackled by isotopic kinetics ; this method allows to put forward differentiation elements for the various treatments of the system (see text).

The evolution in time and quantity (yields) of plant production (wheat, sugar beet) is given. Besides the total lack of manure, nitrogen deficiency, and, for beet, phosphorus deficiency are especially deeply felt. One of the experiments aims at studying the consequences of resuming mineral fertilization on plots unmanured since 1902 ; a production level equal to that obtained on plots manured since this same date was reached on the very first year for wheat and after three years for beet.

The composition of grain in wheat as well as that of the various plant organs generally reveals few differences between the treatments and in particular between those including either exclusively mineral or exclusively organic supply. The lack of one nutritive element (N, P or K) has more consequences than a general decrease of soil nutritive potential (plot without any manure).

As for wheat, the technological properties of the various grain fractions (meal, regrinding, brans) vary little according to treatments ; potassium lack presents however more marked effects. As for sugar beet, phosphorus lack is very detrimental to the juice pureness ; the rate of amino nitrogen for example may reach twice the value observed after the other treatments.

Experiments have been carried out on mice fed with the crops obtained on the plots unmanured since 1902, on plots with a mineral NPK supply or with exclusively farmyard supply. No difference appears in the animal health ; however the mice fed with the plants of the plots receiving exclusively farmyard manure poved to be less prolific.

ZUSAMMENFASSUNG

EINIGE EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSE MIT DEHERAINSCHER ANLAGE

Die im Jahre 1875 eingeführte Deherainsche Anlage für langfristige Versuche besteht aus ungedüngten Parzellen und Parzellen mit organischer, mineralischer oder getrennter N, P oder K Zufuhr. Die experimentellen Ergebnisse betreffen den Boden, die Pflanzen und einen Versuch auf mit den erzielten Ernten gefütterte Kleintiere.

Unter den Bodenuntersuchungen betrifft eine den Stickstoff und eine andere den Phosphor. Die erste wurde getrennt behandelt. Die Zweite bezieht sich auf die Entwicklung der Austauschkapazität von Phosphor mit Hilfe der Isotopenkinetik ; diese Methode ermöglicht, Differenzierungselemente für die verschiedenen Anlagebehandlungen (siehe Text) vorzuschlagen.

Die zeitliche und quantitative (Ertrag) Entwicklung der Pflanzenproduktion (Weizen, Zuckerrübe) ist gegeben. Ausser dem völligen Düngungsfehlen, Stickstoffmangel, und, für Zuckerrübe, Phosphormangel sind besonders wirksam. Der Ziel eines Versuchs war die Untersuchung der Folgen der Wiederaufnahme der Mineraldüngung auf die seit 1902 ungedüngten Parzellen ; eine dieser seit demselben Jahre gedüngte Parzellen gleiche Produktion wurde schon am ersten Jahr für Weizen und nach drei Jahre für Zuckerrübe erzielt.

Die Kornzusammensetzung in Weizen und die Zusammensetzung der verschiedenen Pflanzenteilen zeigt gewöhnlich wenige Differenzen zwischen den Behandlungen und insbesondere zwischen den mit auschliesslich mineralischer oder organischer Zufuhr. Das Fehlen eines Nährstoffs (N, P oder K) hat mehr Folgen als eine allgemeine Abnahme des Nährpotentials des Bodens (ungedüngte Parzellen).

Die technologischen Eigenschaften der verschiedenen Kornfraktionen Mehl, Grüssenkleie, Kleie) des Weizens varieren sehr wenig mit den Behandlungen ; Kaliummangel erzeugt geprägtere Wirkungen. Phosphormangel ist sehr nachteilig für die Reinheit des Zuckerrübensafts ; der Satz von Aminostickstoff zum Beispiel kann zweimal den für die anderen Behandlungen erzielten Wert erreichen.

Versuche wurden auf Maüse durchgeführt, die mit den Ernten der seit 1902 ungedüngten oder mit mineralischen NPK oder ausschliesslich mit Mist gedüngten Parzellen gefüttert wurden. Keine Differenz erscheint was den Gesundheitszustand der Tieren betrifft ; trotzdem erweisen sich die mit den Pflanzen der ausschliesslich mit Mist gedüngten Parzellen weniger fruchtbar.

РЕЗЮМЕ

Несколько экспериментальных результатов полученных на поле Дехерен.

Р. МОРЕЛЬ, К. ШАБУИ, С. БУРЖУА.

Диспозитив долгосрочных опытов Дехерен, заложенный в 1875-м году, состоит из делянок не получавших вообще никакого удобрения, делянок получавших полное минеральное или органическое удобрение, или еще удобрение в котором отсутствовал один из главных питательных элементов N, P или K. Результаты относятся к почве и растениям, и включают результаты опытов с маленькими животными получавшими в корм полевые урожаи.

Два из изучений проведенных на почве относятся к азоту и фосфору; результаты первого из них были уже опубликованы отдельно. Второе-же относится к эволюции характера фосфорного обмена, изученного при помощи изотопной кинетики, метода позволяющего провести различия между разными обработками (см. текст).

Растительная продукция (пшеница, сахарная свекла) рассматривается в смысле ее эволюции во времени и в количественном отношении (урожайность). Кроме случаев полного отсутствия удобрений, недостаточность азота, и, в случае свеклы, недостаточность фосфора, отзываются на растениях особенно сильно. В одном из опытов изучались также последствия возобновления внесения минеральных удобрений с 1902-го года; уровень урожайности равный уровню удобрявшихся уже до этой даты делянок, был достигнут с первого-же года возобновления применения в случае пшеницы, и после трех лет в случае свеклы.

В составе пшеничного зерна, также как и различных органов растения, отмечалось вобщем мало различий после разных обработок, в особенности после обработок состоявших или из исключительно минеральных,

или исключительно органических удобрений. Отсутствие одного только питательного элемента (N, P или K) чувствовалось гораздо сильнее, чем общее ослабление питательного потенциала почвы (делянки без удобрений).

Что-же касается пшеницы, технологические качества разных фракций зерна (мука, крупяные отруби, отруби) изменялись мало в случае разных обработок; отсутствие — же калия чувствовалось наиболее сильно. В случае сахарной свеклы, отсутствие фосфора сильно отзывалось на чистоте полученного сока; содержание в нем аминного азота могло например достичь значений в два раза больших, чем в случаях других обработок.

Проводились также опыты с мышами, которым скармливали урожаи полученные на делянках без удобрения с 1902-го года, получавших полное минеральное удобрение NPK, или удобренных только навозом. В санитарном состоянии подопытных животных этих разных вариантов не было отмечено никакой разницы; однако, мыши, получавшие в корм растения собранные на делянках удобрявшихся только навозом, оказались менее плодовитыми.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bazier R., Guérillot-Vinet A., Guérillot J., 1966. Influence de quelques fumures sur les acides aminés du grain de blé et de la racine de carotte. *Ann. agron.*, 673-686.

Chabouis C., 1975. Le champ d'expérience de longue durée de l'I.N.A. Paris-Grignon. Quelques résultats en culture betteravière. *Hautes études betteravières agricoles*, **28**, 15-19 et **29**, 22-29.

Dehérain P. P., 1876. Cultures du champ d'expérience. *Ann. agron.*, 95-117.

Documents I.N.R.A.-S.E.I., 1975. Étude n° 59 : *Simplification des techniques de travail du sol*, 60-65.

Fardeau J. C., Guiraud G., 1974. Utilisation des filtres millipores en chimie du sol : application à la caractérisation des cinétiques de dilution isotopique des ions dans un sol. *Ann. agron.*, **25** (1), 113-117.

Godon B., 1975. Document interne. École nationale supérieure de Meunerie. Laboratoire de Contrôle et de Technologie des bés.

Guérillot-Vinet A., Guérillot J., Bazier R., Mansuy J., 1961. Études sur la souris de la qualité alimentaire de végétaux cultivés avec ou sans engrais. *Ann. Nut. et Alim.*, 45-52.

Morel R., Richer A., Masson P., 1956. Étude expérimentale de la variation du taux de matière organique du sol dans le champ d'expérience de la Station agronomique de Grignon. *Ann. agron.*, 183-204.

Ville G., 1868. *Les engrais chimiques. Entretiens agricoles donnés au champ d'expériences de Vincennes.* Masson éd.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 881-890.

THE MORROW PLOTS — HUNDRED YEARS OF RESEARCH

Pr. L. F. WELCH

Department of Agronomy,
University of Illinois,
Urbana, Illinois 61801

SUMMARY

The Morrow Plots are the oldest experimental plots in the United States of America. They were established in 1876 to determine the effect of different cropping systems on crop yields and soil properties. The cropping systems used in recent years are continuous maize, a two-year rotation of maize-soybeans, and a three-year rotation of maize-oats-clover. Various soil treatments have been applied since 1904.

Early yields indicated that legumes in the rotation would delay the loss of productivity that occurred with continuous nonlegumes. Soil erosion has not been a problem as the plots have less than 2 p. 100 slope. Fertilizer rapidly restored high productivity to soils that had become unproductive because of no soil amendments. Plots that had been untreated for 79 years, but then fertilized in 1955, produced 91 p. 100 as much maize in the first year of treatment as plots that started receiving treatment in 1904.

Limestone and high rates of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer do not completely substitute for rotation. Continuous maize yielded less than maize in rotation, with both at high rates of fertilizer. This suggests that rotations affected growth of nonlegumes in some way other than just the nitrogen supplied by the legumes.

When DEHÉRAIN was beginning his experiments at Grignon in 1875, the first agricultural experiment station was being founded in the United States in the state of Connecticut. One year later the Morrow Plots were started on what is now the campus of the University of Illinois at Urbana. The plots were designated a National Historic Landmark in 1968 because they « possess exceptional value in commemorating or illustrating the history of the United States ».

The Morrow Plots are named in honor of Professor George E. MORROW, the first dean of agriculture at Illinois. Last year completed 100 years of cropping for the plots. They are the oldest soil research plots in America. The plots were originally established to determine the effect of different cropping systems on crop yields and

soil properties. The original experiment included no soil treatments. Various changes have been made in the experiment through the years. The objective today is to determine the effect of cropping systems and soil treatments on crop yields and soil properties (see fig. 1).

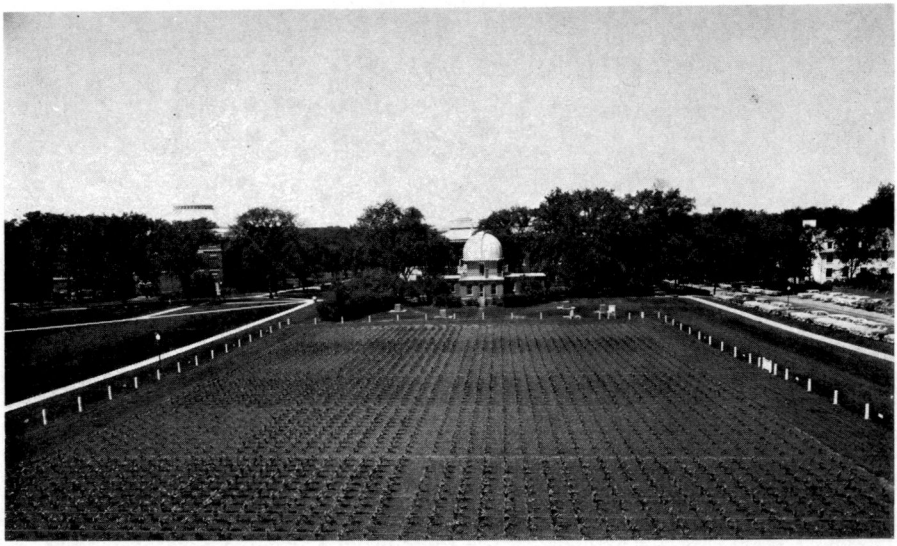


FIG. 1. — *The Morrow Plots on the campus of the University of Illinois, USA. All plots grow maize at the same time only once every sixth year. Differences in early growth of maize are due to rotation and soil treatment.*

This report will be divided into various time periods according to when major changes in cropping practices or soil treatments occurred. This report will deal primarily with yields of maize but will also include oats and soybeans.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

The original experiment consisted of 10 plots, each 0.20 hectare. As the university expanded, the need for additional building sites has resulted in seven plots being discontinued. An astronomy observatory was built on two plots in 1895. In 1903, five more plots were discontinued and the three remaining plots were reduced in size. Each of the three main plots is 0.08 hectare today. The present plots are likely to continue without a further reduction in size because of the strong interest in the study.

The three main plots retain the same numbers as assigned in 1876. Each main plot has a different rotation. Plot 3 has been in continuous maize since 1876, table 1. Plot 4 was in a two-year rotation of maize-oats from 1876-1967 but was changed to maize-soybeans in 1968. The six-year rotation on plot 5 was changed to a three-year rotation of maize-oats-clover in 1901. Since there is only one main plot for each of the three cropping systems, each crop in the rotation does not appear each year except for the continuous maize plot.

The soil is Flanagan silt loam with a slope of 1 to 2 p. 100.

Through the years each of the three main plots (cropping system) has undergone division into sub-plots (soil treatments). Soil treatments will be given in each period for which yields are presented.

TABLE I

Cropping systems used on the Morrow Plots

Plot	Period	Cropping system
3	1876-	Continuous maize (*Zea mays* L.)
4	1876-1967	2-year rotation of maize-oats [1] (*Avena sativa* L.)
	1968-	2-year rotation of maize-soybeans (*Glycine max* L.)
5	1876-1900	6-year rotation of maize-maize-oats clover-clover-clover (*Trifolium* L.)
	1901-	3-year rotation of maize-oats-clover

[1] Clover was seeded from 1904-1966 in the oats on the manure-limestone-phosphate plots and plowed under the following spring for maize.

RESULTS

1876-1903

The highest maize yield obtained during this early period was 4 390 kg/ha on the 6 year rotation plot in 1892. The lowest yield was 1 135 kg/ha on the continuous maize plot in 1898. Two facts were established during the first 28 years. Firstly, the highly fertile prairie soil could be depleted with cropping. Secondly, depletion could be postponed by using crop rotations.

1904-1954

Amendments were first added to the plots in 1904. Each main plot was divided into four subplots, each 0.02 ha. Two of the subplots continued to receive no soil treatment and all-above-ground plant material was removed. Two subplots received manure, limestone, and phosphorus (MLP). The manure was applied immediately before the maize for all cropping systems. The rate of manure was equal to the amount that would have been produced if the crops grown during the rotation had been fed to livestock. Expressed on an annual basis, the rate of manure has ranged from about 5-7 MT/ha. Limestone has been applied at four times for a total of 24.3 MT/ha. Of the two sub-plots that received phosphorus, one received rock phosphate and the other steamed bone phosphate. The two sources of phosphorus were added on the basis of equal cost. The rate of rock phosphate applied was four times the rate of steamed bone phosphate. Assuming that rock and bone phosphate each contained 30 p. 100 P_2O_5, the total P_2O_5 added was 4 436 kg/ha as rock and 1 109 kg/ha as bone. The preceding rates were added during 1904-1925, and no rock and bone phosphate have been added since 1925.

Maize is planted on all plots every sixth year. During 1905-1954 all plots have grown maize at the same time in eight different years, the first year being 1907. Similarly, oats have grown on two of the main plots at the same time in eight different years, the first year being 1908.

Average yields for these eight years are shown in table 2. Manure, limestone, and rock phosphate increased yields the same amount as manure, limestone, and bone phosphate. Yields in table 2 are also the average for these two sources of phosphorus.

TABLE 2

Yields of maize and oats with different cropping systems and soil treatments, 1904-1954

Cropping system	Maize, q/ha		Oats, q/ha	
	O	MLP	O	MLP
Continuous maize	15.4	31.7	—	—
Maize-oats (1)	21.3	42.6	12.4	21.3
Maize-oats-clover.....	35.1	48.6	16.7	23.8

(1) Clover was seeded in the oats on the MLP plots and plowed under the following spring for maize.

The use of manure, limestone and phosphorus increased crop yields. It is not possible to separate the individual effects of these three amendments. Phosphorus and decomposed manure would provide a direct source of necessary plant nutrients. Limestone may have had an indirect effect by creating a more favorable environment for growth of legumes in the rotation. Increased growth of legumes would result in more symbiotically-fixed nitrogen, some of which would be available for increasing growth of nonlegumes in the rotation.

Rotation partially substituted for soil treatment, and soil treatment partially substituted for rotation. But, neither completely substituted for the other with respect to their influence on crop yields. The combination of MLP and the three-year rotation resulted in highest crop yields. The combination increased maize yields about 200 p. 100 when compared with continuous maize and no soil treatment.

Rotation increased yield relatively more where there was no soil treatment than where MLP was applied. The three-year rotation resulted in maize yields 128 p. 100 higher than with continuous maize, without soil treatment in either case. With MLP in both systems, maize yielded 53 p. 100 more with the three-year rotation than with continuous maize. The higher crop yields with the rotations were probably due to nitrogen supplied by the legume.

MLP increased crop yields relatively less with the three-year rotation than with the other two cropping systems.

1955-1975

The plots were 80 years old before nitrogen and potassium fertilizers were first applied in 1955. Highly soluble phosphorus fertilizer was also applied for the first time. These materials and limestone were applied to one-half of one of the two sub-plots that had not received soil treatment since 1876. The objective was to determine how rapidly commercial fertilizer could restore high productivity to soils that had been cropped for 80 years without treatment. One-half of one of the two sub-plots that began receiving MLP in 1904 also began receiving LNPK in 1955. These treatments started in 1955 are referred to as medium LNPK.

For these newly-treated plots, limestone was added at 11.2 MT/ha in 1955 and at 6.7 MT/ha in 1963 and in 1967 to the previously untreated plots. For the plots that had previously received MLP, limestone was added at 4.5 MT/ha in 1955 and at 2.2 MT/ha in 1963. Nitrogen is added for maize at 224 kg/ha. Superphosphate and muriate of potash were added in 1955 to provide 280 kg/ha of P_2O_5 and 112 kg/ha of K_2O. During 1956-1966, P_2O_5 and K_2O were added at 45 and 34 kg/ha, respectively. Since 1967, phosphorus and potassium have been added to maintain a P soil test of about 20 p.p.m. and exchangeable K of about 120 p.p.m. in the plow layer. The soil test for P is with an extracting solution of 0.025 N HCl + 0.03 N NH_4F (BRAY and KURTZ, 1945) and exchangeable K is determined with 1 N NH_4OAc at pH 7.0.

Maize yields indicated that depleted soil could be rapidly restored with LNPK. On the subplot that had been growing continuous maize without any soil treatment for 79 years, yields increased 31.4 q/ha the very first year that the medium rate of LNPK was added. Data in table 3 are the average for 1955, 1961, 1967, and 1973. Plots in continuous maize that first received soil treatment (LNPK) in 1955 yielded 91 p. 100 as much during 1955-1973 as plots that began receiving MLP in 1904 and LNPK in 1955 (70.9 versus 77.8 q/ha). For the two- and three-year rotations, maize yields were about the same when LNPK was added to previously untreated plots and plots that had earlier received MLP (84.7 versus 84.0 q/ha for the three-year rotation).

TABLE 3

Maize yields as affected by cropping system and soil treatment, 1955-1973

Soil treatment	Maize yields, q/ha		
	Continuous maize	Maize-oats (2)	Maize oats-clover
None	26.3	36.4	47.7
MLP (1904) (1)	56.4	77.8	85.8
Med. LNPK (1955)	70.9	79.0	84.7
MLP (1904), Med. LNPK (1955)	77.8	81.5	84.0

(1) Denotes years soil treatment began.
(2) This was changed to maize-soybeans, beginning 1968.

If erosion is not a problem so that topsoil remains in place, fertilizer quickly restored productivity to unproductive soil. But, rotation maize continued to yield more than continuous maize even with soil treatment. Without fertilizer nitrogen added, maize grown in rotation with a legume undoubtedly received more nitrogen than maize grown continuously. But if nitrogen or other fertilizer nutrients are the only cause of yield differences among rotations, then these yield differences would be expected to disappear if more than adequate fertilizer is applied. High rates of LNPK were begun in 1967 on plots that previously had received MLP since 1904. Maize on these newly-treated plots receives N at 336 kg/ha, and P and exchangeable soil K are maintained in the plow layer at about 60 and 200 p.p.m., respectively.

The maize-oats rotation was changed to maize-soybeans in 1968. This was the first rotation change since 1901 and only the second change since the study started. Soybeans replaced oats because the former have a more prominent role in Illinois agriculture. Maize yields in Table 4 are the average for 1969, 1971, 1973, and 1975. Maize in the soybean rotation has yielded 14.4 q/ha more (107.2 versus 92.8) than continuous maize, even with the high rate of LNPK since 1967. The rotation apparently has influenced some growth factors other than availability of nutrients. Otherwise, maize yields from the continuous maize and maize-soybean rotations would be expected to be equal from the high LNPK plots.

TABLE 4

Maize yields with continuous maize and the maize-soybean rotation, 1969-1975

Soil treatment	Maize yields, q/ha	
	Continuous maize	Maize-soybeans (1)
None	31.4	50.2
MLP (1904)	59.0	82.2
Med. LNPK (1955)	84.0	93.4
MLP (1904), Med. LNPK (1955)	87.2	92.2
MLP (1904), High LNPK (1967)	92.8	107.2

(1) Maize-oats, 1876-1967; maize-soybeans since 1968.

The highest maize yield ever attained from the Morrow Plots was 119.8 q/ha, produced in 1975 on the high LNPK plot in the maize-soybean rotation. The continuous-maize plot with high LNPK yielded only 110.0 q/ha in 1975. The reason for this difference in maize yield will have to wait for some future lesson from the plots.

In the maize-soybean rotation, soil treatment affected maize yield more than soybeans (table 5). Maize yielded 47 p. 100 but soybeans yielded 76 p. 100 as much with no soil treatment as with the high fertility treatment. The MLP (1904) plot has produced soybean yields as high as any soil treatment. Maize yields continued to increase with medium and high LNPK.

TABLE 5

Maize and soybean yields with different soil treatments in the maize-soybean rotation

Soil treatment (1)	Maize		Soybeans	
	(q/ha)	(%) (2)	(q/ha)	(%) (2)
None	50.2	47	25.6	76
MLP (1904)	82.2	77	35.0	104
Med.LNPK (1955)	93.4	87	33.0	98
MLP (1904), Med. LNPK (1955)	92.2	86	34.3	102
MLP (1904), High LNPK (1967)	107.2	100	33.6	100

(1) Nitrogen fertilizer for the indicated plots was added only for maize.
(2) Yield as a percent of yield with high LNPK.

The LNPK started in 1955 and 1967 increased maize yields but not soybeans, when compared to yield with MLP (1904). This is probably partially due to the fact that nitrogen fertilizer generally increases the yield of maize but not soybeans. Nitrogen from air that is unavailable to maize becomes available to soybeans through the soybean-bacteria association.

Soil Properties

Considerable differences in nitrogen content of soil occurred by 1904 with the three rotations (table 6). Continuous maize resulted in the lowest amount of soil nitrogen in 1904. With continuous maize and no soil treatment, there was only 67 p. 100 as much soil nitrogen in 1973 as in 1904. Rotation and soil treatment

TABLE 6

Total soil nitrogen in the plow layer in 1904 and in 1973 as affected by cropping system and soil treatment

Cropping system	Soil treatment	Soil N, q/ha		N in 1973 as p. 100 of 1904
		1904	1973	
Continuous maize-	None	43	29	67
	MLP (1904)	46	37	80
Maize-soybeans (1)	None	48	35	73
	MLP (1904)	52	46	88
Maize-oats-clover	None	58	45	78
	MLP (1904)	59	55	93

(1) Maize-oats, 1876-1967 ; maize-soybeans since 1968.

slowed the rate of decline of soil nitrogen. There was 93 p. 100 as much soil nitrogen present in 1973 as in 1904 on the maize-oats-clover plot that received MLP. Even without soil treatment for the three-year rotation there was 78 p. 100 as much soil nitrogen in 1973 as in 1904. These data support the earlier statement that part of the difference in maize yield for different rotations was probably due to differences in soil nitrogen.

Low yields on the untreated plots reflect not only low nitrogen, but also low pH, phosphorus, and potassium levels. Soil tests in 1974 indicated a pH of 5.4, P of 6 p.p.m., and exchangeable K of 100 p.p.m. Soil tests values desired for good crop yields are pH, 6.4 ; P_1, 22 p.p.m. ; and K, 150 p.p.m.

Harvested grain has removed about 2 385 kg/ha of N, 590 kg/ha of P, and 710 kg/ha of K from the untreated, continuous-maize plots.

Some earlier publications that deal with soil properties are those of STAUFFER, MUCKENHIRM and ODELL (1940), STEVENSON (1956). STEVENSON, KIDDER and TILO (1967), GUERNSEY *et al.* (1969), and JONES and HINESLY (1972).

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

LES PARCELLES MORROW. CENT ANS DE RECHERCHES

Les parcelles Morrow : ce nom désigne les plus anciennes parcelles d'expérimentation des États-Unis. Elles ont été mises en place en 1876 afin de déterminer l'influence de différents systèmes de culture sur les rendements et sur les propriétés des sols. Au cours de ces dernières années, les systèmes de culture comprenaient du maïs en monoculture, maïs-soja en assolement biennal et maïs-avoine-trèfle en assolement triennal. Depuis 1904, le sol a subi différents traitements.

Les rendements obtenus dès le début indiquaient que les légumineuses incluses dans la rotation pouvaient retarder l'apparition de la baisse de productivité observée dans un système de culture sans légumineuses. Comme la pente des parcelles était inférieure à 2 p. 100, il ne s'est pas posé de problème d'érosion du sol. Grâce aux apports d'engrais, les sols, devenus improductifs faute d'amendements, sont rapidement devenus à nouveau productifs. Des parcelles non traitées pendant 79 ans, puis fertilisées en 1955, ont donné, au cours de la première année de fertilisation, un rendement de maïs égal à 91 p. 100 du rendement des parcelles recevant annuellement cette même fertilisation, depuis 1904.

Les apports de calcaire et de fortes doses d'engrais azotés, phosphatés et potassiques ne permettent pas de se passer entièrement d'une rotation des cultures. Les rendements du maïs en monoculture ont été moins élevés que ceux du maïs en rotation avec un haut niveau de fertilisation dans les deux cas. Il semble donc que les rotations affectent la croissance des non légumineuses par autre chose que l'azote fourni par les légumineuses.

ZUSAMMENFASSUNG

« MORROW PLOTS » EIN 100-JAHRIGE VERSUCHSANLAGE

Die « Morrow Plots » genannte Versuchsparzellenanlage ist die älteste in der Vereinigten Staaten. Sie wurde in 1876 eingerichtet, um den Einfluss verschiedener Anbausysteme auf Ernteertrag und Bodeneigenschaften zu ermitteln. Während der letzten Jahre wurden Mais in Einfelderwirtschaft, sowie Mais-Sojabohne in Zweifelderwirtschaft und Mais-Hafer-Klee in Dreifelderwirtschaft angebaut. Verschiedene Bodenbehandlungen wurden seit 1904 eingesetzt.

Von den ersten Erträgengeht hervor, dass der Anbau von Hüsenfrüchtler in der Fruchtfolge eine Verschiebung der Ertragsminderung, den man bei Einfelderwirtschaft mit Nichtleguminosen feststellen kann, zur Folge hat. Da der Abhang der Parzellen unter 2 p. 100 lag, kamen Bodenerosions effekte nicht in Frage. Durch Düngemittelzufuhr konnte eine hohe Ertragsleistung der Böden, die durch Mangel an Anreicherung unergiebig geworden waren, schnell wieder erreicht werden. Auf Parzellen, die während 79 Jahren unbehandelt lagen und dann in 1955 gedüngt wurden, konnte während des ersten Behandlungs jahres 91 p. 100 des Ertrags der Parzellen, die seit 1904 gedüngt worden waren, erzielt werden.

Kalkar und höhe Gaben an stickstoff, Phosphor- und Kalidüngern genügen nicht, um eine Fruchtfolge ganz zu ersetzen. Mit Mais in Einfelderwirtschaft wurden kleinere Erträge erhalten als mit Mais in Wechselwirtschaft, obwohl in beiden Fällen höhe Gaben an Düngemitteln zugeführt worden waren. Diese Befunde deuten darauf hin, dass die durch die Fruchtfdge erzeugte, Beeinflussung des Pflanzenwachstums bei Nichtleguminosen nicht nur in einer Stickstoffzufuhr durch Leguminosen besteht.

РЕЗЮМЕ

Делянки « Морроу » : 100 лет исследований.

Л. Ф. УЭЛЬШ.

Делянки « Морроу » — название самых старых экспериментальных делянок Соединенных Штатов Америки. Они были заложены в 1876-м году для определения влияния различных систем культуры на урожайность и свойства почвы. В последнее время на них проводилась монокультура кукурузы, двухлетний севооборот кукуруза — соя, и трехлетний севооборот кукуруза — овес — клевер. С 1904-го года почва обрабатывалась разными способами.

Урожаи, полученные с самого начала опыта, указывают, что включение в чередование культур бобовых, может отсрочить уменьшение продуктивности наблюдавшееся в их отсутствии.

Виду того что уклон делянок не превышал 2 %, не было и задач связанных с эрозией. Благодаря внесению удобрений, почвы ставшие непродуктивными в их отсутствии, снова быстро приобретали продуктивность. Делянки неудобрявшиеся в течении, 79-ти лет и снова удобренные в 1955-м году, дали, в течении первого года удобрения, урожай кукурузы равный 91 % урожая с делянок получавших одно и тоже удобрение каждый год, начиная с 1904-го года.

Известкование и повышенные дозы азотного, фосфорного и калийного удобрений не позволяют полностью обойтись без севооборота. Урожайность монокультуры кукурузы была более слабой чем в севообороте, при высоком уровне удобрения в обоих случаях. Это, кажется, означает, что севообороты влияют на рост не бобовых растений, при помощи чего-то иного, чем азот доставляемый почве бобовыми.

REFERENCES

Bray R. H., Kurtz L. T., 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, **59**, 39-45.

Guernsey C. W., Fehrenbacher J. B., Ray B. W., Miller L. B., 1969. Corn yields, root volumes, and soil changes on the Morrow plots. *J. Soil Water Con.*, **24**, 101-104.

Jones R. L., Hinesly T. D., 1972. Total mercury content in Morrow plot soils over a period of 63 years. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36**, 921-923.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 891-924.

RATE OF ROCK PHOSPHATE DISAPPEARANCE FOR THE MORROW PLOTS

M. P. CESCAS [1] and E. H. TYNER

Department of Agronomy,
University of Illinois at Urbana-Champaign,
Illinois U. S. A. 61801

SUMMARY

The Morrow Plots, America's oldest experimental field, offered an unique opportunity to study the longterm fate and effects of rock phosphates under three cropping systems. The conclusions based on the results of this investigation are summarized :

1. pH changes followed the schedule of lime applications for the rock phosphate treated plots. No significant change in pH occurred for the untreated plots.
2. The total phosphorus of the particle size separates of untreated plots increased with decreasing particle size. The rock phosphate treated plots separates exhibited important total P content increases in all fractions (sand > clay > fine-silt > coarse-silt).
3. Increases in Al-P, Fe-P, Ca-P, Bray P_1 extraction values and P^{32} exchangeable-P were due to rock phosphate treatments.
4. Total phosphorus content, Al-P, Fe-P, Ca-P, Bray P_1 and P^{32} exchangeable-P all decreased with time, the slopes being greater for the treated than for the intreated plots.
5. The P^{32} exchangeable-P data suggested that Ca-P was the most labile form of P whereas the Bray P_1 method suggested that Fe-P was the most labile form for plots treated with rock phosphate. This surprising finding was attributed to the fact that the Bray P_1 is a very weak extractor of Ca-P. From phosphorus removal data by plants, P^{32} exchangeable-P seemed to be the more reliable method for assessing the P availability status for plots treated with rock phosphate.

I. — INTRODUCTION

At about the turn of the present century, CYRIL G. HOPKINS advocated the use of raw rock phosphate for building-up soil phosphate reserves as an integral part of what was to be known as the « Illinois system of permanent soil fertility » (STEWART, 1920).

[1] New address : Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Food Science, Laval University, St Foy P. Q., Canada.

The impact of this early recommendation has persisted to recent years. The direct application of rock phosphates to soils has much declined in recent years. Even so, Illinois farmers in 1967 applied approximately 168,000 tons of rock phosphate containing about 53,700 tons of P_2O_5 (MOATS, 1968). This represented 24 p. 100 of all the P_2O_5 applied in Illinois in that year!

The Morrow Plots, America's oldest experiment field, were initially established in 1876 to demonstrate pratical lessons in soil management. Although the cropping patterns and the applied treatments have been changed occasionally, the specific treatment this investigation is concerned with was that involving the application of rock phosphate. The initial rock phosphate applications began in 1904 and were discontinued in 1919. During this interval, 13,200 pounds per acre of rock phosphate have been added to all treated cropping systems. Since 1919, except for the phosphate added in the form of manure to the manure-lime-rock phosphate treated plots, these plots have been residual with respect to rock phosphate. Fortunately, soil samples were taken for all the treated and untreated plots at about decade intervals. These samples represent a unique opportunity to study the long term fate and effects of rock phosphate under three cropping systems. This was the primary objective of the present investigation.

A. — *Factors affecting the usefulness of rock phosphate*

The usefulness of rock phosphate depends upon several factors. These include the soil reaction (pH), the plant species grown, the fineness of the material, the source of the rock phosphate, microbial activity and the presence of salts in the soil solution. There is a very voluminous literature on rock phosphate. Only selected reports of the more informative work will be reviewed.

1. *Soil reaction* (pH) *and cation exchange properties.*

FORD (1932) studied the distribution, nature and availability of the phosphates in certain Kentucky soils and their mechanical separates. He concluded that for limed rock phosphate treated plots, the lime tended to neutralize the soil solvents which act upon rock phosphate, and thereby decreased its rate of dissolution. The saturation of the soil solution with calcium bicarbonate was thought to be the factor influencing the rate of dissolution.

FRIED and MACKENZIE (1950) using neutron-irradiated rock phosphate investigated the effect of pH, rate of application and plant species on the plant's utilization of phosphorus from rock phosphate and super-phosphate. Vetch and alfalfa were the test crops. They found that after three cuttings vetch had utilized only 6.5, 4.6 and 3.2 p. 100 of the phosphorus supplied as rock phosphate at pH 4.9, 5.5 and 5.8, respectively. For alfalfa they observed that 4.8, 4.1 and 2.2 p. 100 of the rock phosphate were utilized at pH 4.9, 5.5 and 5.8 respectively. The same trends were observed for ryegrass. They also observed a higher Ca^{45} activity in plants at lower pH, from which they concluded that this was an indication of a higher solubility of rock phosphate at the lower pH values.

ELLIS *et al.* (1955) adjusted quartz sand pot cultures to various pH values by the addition of variously saturated bentonite clays. Reaction values of pH 4.9, 5.5, 6.2,

6.7 and 7.4 were used. Florida rock phosphate was added at a rate of 500 pounds per acre and oats grown. The highest yields were obtained at pH 5.5. Increased pH's of the culture medium resulted in lower yields. Unexplained low yields were obtained at pH 4.9 paralleling similar results obtained by JOOS and BLACK (1950). Perhaps at this pH level some toxicity effects developed e. g. aluminum. They also conducted experiments with soil cultures with the purpose of comparing the availability of the phosphorus in rock phosphate when applied to a strongly acid soil before and after neutralizing its acidity with lime. In one set of pots, lime was added one month prior to the rock phosphate and in another set the order was reverse. The pots were kept at field moisture capacity for a week prior to seeding oats. They reported better growth and better phosphorus uptake (50 p. 100 greater) for the pots which received rock phosphate prior to lime than for those which received lime prior to the rock phosphate application.

JOOS and BLACK (1950) grew Sudan grass in bentonite quartz sand medium at adjusted pH levels of 4.6, 5.6 and 6.6. They found that rock phosphate was more available at pH's 4.6 and 5.6 than at pH 6.6. Better yields of Sudan grass were obtained and a greater uptake of phosphorus occurred at pH 5.6 than at pH 4.6 when the culture medium containing rock phosphate was incubated for a period of five months prior to planting Sudan grass. They concluded that factors other than pH were involved in the availability of rock phosphate and proposed that an important factor was the reaction the dissolved phosphate undergoes with the soil at the different pH levels.

A general relation between pH and Ca activity and degree of saturation exists in soils. These relations are also influenced by the type of exchangers with which the rock phosphate is in contact. GRAHAM (1955) conducted a study of the availability of natural phosphate to oats and showed that the amount of phosphorus present in harvested plants was related to the relative driving energies of the different colloidal systems mixed with the rock phosphate. Colloidal systems e. g. Amberlite, bentonite clay, which exhibit low bonding energies for hydrogen and high bonding energies for calcium, possessed high capacities to solubilize rock phosphate. He concluded that the weathering of affected soil is associated with the relative retention of both bydrogen and calcium in the exchange complex.

DRAKE and STECKEL (1955) showed that plant roots with high exchange capacity are the most efficient in obtaining phosphorus and dissolving it from the soil and rock phosphates. They stated that the mechanisms by which phosphorus availability can be enhanced were : (1) by the bonding of calcium by the plant root colloid to dissolve the rock phosphate crystal and (2) by the complexing of Al and Fe ions by organic anions which enhanced the solubilization of soil Al- and Fe-phosphates.

2. *The plant species factor.*

TRUOG (1916) working with sand cultures showed that plants differed greatly in their capacity to obtain phosphorus from rock phosphate. He observed that plants having a high calcium content grew better on sand cultures receiving rock phosphate than plants having a low calcium requirement due to removal of calcium by the former which favored further dissolution of rock phosphate. He further stated that the greater availability of rock phosphate in acid soils than in non-acid soils, especially for plants of low feeding power for rock phosphate, was due to the removal of calcium

bicarbonate by the acid soil, the process of solubilization of rock phosphate being thus allowed to continue.

BAUER (1921) mixed rock phosphate with several forms of organic matter in sand and soil. He failed to show a solvent effect for decaying organic matter on rock phosphate and showed a decreased amount of soluble phosphorus from that present at the beginning of the experiment. Looking at the feeding power of fifteen plant species he found that plants which are high in calcium have a greater ability to feed on rock phosphate. He concluded that sweet clover which possesses a remarkable feeding power for rock phosphate is well suited for crop rotations where rock phosphate is applied, pointing out that growing crops of high feeding power e. g. sweet clover, to supply organic matter and available phosphorus in rotation with crops of low feeding power was a question of considerable practical importance in the utilization of rock phosphate.

BARTHOLOMEW (1928) grew eleven crops commonly grown in the southern states in quartz cultures with different phosphorus treatments in order to determine their ability to use rock phosphate as a source of phosphorus. Cotton, cowpeas, sorghum, seredella, beggarweed, lespedeza, bur clover, rice, and velvet beans made very little growth on rock phosphate. Vetch made about one-third and sweet clover about three fourths as much growth with rock phosphate as with superphosphate. There was no definite relation between the calcium phosphorus ratio in the plants and their ability to feed upon rock phosphate. He concluded that factors other than the calcium content of plant were involved.

COOK (1935) tested Truog's theory by growing oats, corn, millet, and buckwheat in quartz sand cultures in which rock phosphate served as the source of phosphorus. Some of the cultures contained H-saturated bentonite or H-saturated exchange material (prepared by leaching organic and inorganic soils with 0.05 N HNO_3 until no calcium could be detected in the leachate) and others contained Calcium-saturated exchange material or Calcium-saturated bentonite. He found that oats, corn and millet could use rock phosphate effectively only in the presence of a H-saturated exchange material but that buckwheat could utilize it in the presence of either H- or Ca-saturated exchange materials. Corn, oats and millet have low Calcium requirements while that of buckwheat is high. He concluded that an increase in base saturation lowered the immediate availability of rock phosphate to poor feeders such as corn and oats.

FRIED (1953) compared plant species as to their feeding power for both monocalcium phosphate and rock phosphate. Even after the effect of size and extensiveness of the root absorbing surface was eliminated, species differed in their capacity to absorb phosphorus from basic calcium phosphates. He showed that the phosphorus of rock phosphate was most available to buckwheat and was more available to the legumes, alfalfa, crotalaria and ladino clover than to the grasses, orchard, grass, bromegrass, perennial ryegrass, millet and oats.

3. *The fineness factor.*

The relative difference in availability of the various size rock phosphate grades have been found to be inversely related to the effectiveness of the phosphate rock. CONNER and ADAMS (1926) showed that the reground phosphate (in a ball mill) was only 7.7 p. 100 more effective than the commercial phosphate. They found that

the finest mechanical separate in the phosphate (< 0.05 mm) was only 10 p. 100 more effective than the commercially ground rock phosphate.

JOOS and BLACK (1950) studied the availability of rock phosphate as affected by particle size and contact with Bentonite at three different pH values. They found that the relative order of decreasing effectiveness of the various size grades was 400 mesh, commercial (87 p. 100 through 300 mesh), and 150 to 300 mesh for all pH levels.

CARO and HILL (1956) determined the characteristics and the fertilizer value of phosphate rock from different sources. They observed that the influence of particle size on solubility follows a regular pattern within the screened fractions. A small but consistent increase in soluble phosphorus with decrease in particle dimension was exhibited.

ARMIGER and FRIED (1957) studied the plant availability of different mesh sizes of various rock phosphates. They reported that the 100-mesh sieve was only slightly less effective than the 325 mesh. They concluded that fine grinding was not as important as the source of the phosphate rock.

4. *The source of rock phosphate.*

CARO and HILL (1956) as part of a systematic investigation of the fertilizer value of rock phosphates measured the solubility in fertilizer solvents, surface properties, physical properties of particles and chemical composition of several types of rock phosphates.

Foreign rocks from Tunis and Curacao gave the highest solubilities, followed by domestic rocks from South Carolina, Florida, Idaho, Tennessee and Virginia. The Tunis rock ranked highest and the Virginia lowest in gas adsorption surface area and readily exchangeable phosphorus. Tunis, Morocco, Florida and South Carolina rock phosphates were relatively light and of low density. Statistical comparison of all laboratory measurements with crop yields in greenhouse cultures showed that the phosphate-bound carbonate content and citric acid solubility were the criteria giving the best agreement with yields.

ARMIGER and FRIED (1957) compared the availability of ten sources of rock phosphate by growing buckwheat and alfalfa in a greenhouse study. Tunisian rock gave the largest plant growth response and supplied more phosphorus than other rocks of either foreign or domestic origin. Of the domestic sources, South Carolina land rock and one of two Florida land pebbles rated highest. Idaho rock was the only material exhibiting a low initial response pattern that improved with successive cuttings of alfalfa. Virginia apatite was not much better than the check. Tennessee Brown and Montana rocks supplied some phosphorus to the plant but yield responses and phosphorus uptake were very low. Ammonium citrate and citric-acid solubility tests seemed to be equally efficient indexes for predicting the relative value of phosphate rocks as sources of phosphorus for plant growth. They found that both chemical and physical differences between materials afforded explanations for the differences in their agronomic value.

The chemical composition of the apatitic component of rock phosphate has been shown to have an appreciable influence on nutrient value. BARTHOLOMEW (1935) and GERICKE (1949) found that high yields were associated with low fluorine contents. However, CARO and HILL (1956) stated that the role of fluorine was not very clear.

The natural degree of fluorination and of carbonation are the salient chemical properties which affect the agronomic value of apatite. Fluorination lowers the reactivity whereas carbonation enhances the activity of natural apatite and the influence of the latter factor often more than not compensates for the effect of the former.

5. *The effect of various soluble salts.*

JONES (1948) studied the availability of phosphorus in rock phosphate as influenced by potassium and nitrogen salts, lime and organic matter using rye as a test crop. The data obtained indicated that the pH or lime level influenced the availability of the phosphorus in rock phosphate more than did any other single factor. Without lime, rye took up 235 p. 100 as much phosphorus from the rock-phosphate treated plots as was taken up by the rye that was limed. Ammonium sulfate and potassium chloride mixed with rock phosphate and added to the soil increased the uptake of phosphorus. Without nitrogen and potassium, peat increased the yield of rye 10 p. 100 but it did not materially influence the uptake of potassium or phosphorus.

HOWE and GRAHAM (1957) studied the availability of phosphorus held in rock phosphate in relation to the soluble salt content of sandclay cultures. Alfalfa was grown as the test crop. They observed that calcium reduced phosphorus uptake with small reductions in plant yields. They reported various effects with magnesium. Potassium carbonates and sulfates gave positive yield responses whereas chlorides depressed the yields. Sodium salts gave decreases in growth and yields.

BAUER (1920) using sand cultures showed that yields of corn grown with rock phosphate could be greatly increased by periodically leaching out the calcium bicarbonate that had accumulated in the cultures, due to the greater proportional removal of the phosphorus than the calcium by the plant. Removal of calcium by leaching was believed to enhance the dissolution rate of the rock phosphate.

Theories of solubilization of rock phosphate, based on thermodynamically equilibrated chemical systems have been reported by CHAVERRI and BLACK (1966 *a*, *b*) These help to explain some of the effects of pH, activities of calcium and other ionic species (e. g. Fe^{+3} and Al^{+3}) upon solubilization of rock phosphates in soils.

6. *The effect of soil microorganisms.*

GERRETSEN (1948) studied the influence exerced by microorganisms on phosphate uptake by oats, mustard, sunflower, and rape which he grew in sterile and non-sterile pot cultures. Insoluble or difficulty soluble phosphates were added as Algerian phosphate, Moroccan-phosphate, bone meal, tri- and dicalcium phosphates and ferrophosphate. In many cases, the amount of phosphorus assimilated by the plants as well as the weight of these plants was markedly greater for the non-sterile treatments suggesting that microorganisms perhaps made available a certain amount of phosphorus otherwise unavailable. As further evidence of the solvent action of microorganisms present in the rhizosphere on insoluble phosphates, he buried glass plates, covered with an agar film containing calcium phosphate precipitates in the culture vessels. Halos of dissolution about the phosphate particles were noted. This was interpreted as direct evidence of the solubilization of insoluble phosphates by microorganisms.

GERDEMANN (1965) reported that soils in which mycorrhizal infected and non-mycorrhizal maize had been grown had significantly different contents of P_1 and P_2

phosphate and available K contents. After 93 days of experiment, the available phosphorus and the potassium contents of the soil in which mycorrhizal maize had grown was significantly lower than in that in which nonmycorrhizal plants had grown. Following GERDEMANN'S work, MURDOCK *et al.* (1967), in experiments with phosphorus sources of different availability (rock phosphate, tricalcium phosphate, monocalcium phosphate and superphosphate) found that mycorrhizal and nonmycorrhizal maize grew equally well when the phosphorus source was readily available. When the phosphorus source was slowly available (tricalcium phosphate and rock phosphate), however, they observed that mycorrhizally infected maize had a higher phosphorus content and grew better than nonmycorrhizal maize. These suggest that micro-organisms may exert solvent effects which enhance the availability of insoluble phosphates. It is interesting to note that Russian workers (BEREZOVA *et al*, 1956) advocated inoculation of soils with active bacteria for a better solubilization of bone meal and finely ground rock phosphate.

TARDIEUX-ROCHE (1966 *a*, *b*) in an extensive study reported that all soils have ample numbers of microorganisms capable of attacking and solubilizing rock phosphates. She stated that the proportion of organisms of the total microbial population capable of dissolving tri-calcium phosphates varied somewhat. From 1 to 35 p. 100 of the total microbial population was active in rock phosphate solubilization. The number of the solubilizing microorganisms was not a function of pH, particle size, organic matter content and available P content. Using North African phosphates, she compiled an extensive catalog of the « active » organisms. Her introduction (1966 *a*) is perhaps the most complete review of the literature related to the attack of rock phosphate by soil microorganisms. Furthermore, she not only studied the influence of microorganisms upon the solubilization of rock phosphate but also considered the effect of additions of rock phosphate upon the microbial population per se. In the latter case, she found increases in population number and activity induced by rock phosphate. The results of TARDIEUX-ROCHE indicate that incubation as proposed by the Russian workers (BEREZOVA *et al.*, 1956) is not necessary since rock phosphate additions promoted bacterial growth and activity.

In summary, the usefulness of rock phosphate is primarily a function of pH which determines the initial dissolution rate and the mechanism which favor continuous dissolution through mass action equilibria, for example, removal of soluble Ca by plants and/or exchange adsorption, and phosphorus removal from the soil solution by sorption reactions involving iron and aluminum compounds. Furthermore, it is evident that the factor, irrespective of pH, which is involved in the initial dissolution rate of rock phosphate is their apatitic component which has been found to vary with the source. In general, rock phosphates from North Africa are characterized by apatites in which there is a greater degree of carbonate substitution within the lattice structure. This has been found to weaken the structure permitting a greater dissolution rate than where F^- or Cl^- substitutions occur.

B. — *The fate of rock phosphates applied to soils*

Many investigators have shown that a large part of the rock phosphate applied to soils persists as such. METZGER (1939) studied the nature, extent and distribution of fertilizer residues in soils from a continuous alfalfa experiment which had been

discontinued after 27 years of annual treatment. Each plot was sampled at different depths and analyzed for total phosphorus, easily soluble phosphorus (Truog's method) total potassium, exchangeable potassium, exchangeable sodium, pH values and base exchange capacity. These analyses were compared to those of the original soil. The rock phosphate treated plots received 1,395 pounds of P per acre of rock phosphate during the 27 years period and the equivalent of 300 pounds of P per acre in manure. He reported that easily soluble phosphorus had accumulated at all depths except in the 24-36 inch layer. The data revealed greater residual P accumulation for the rock phosphate treated plots. These were large only to a depth of 12 inches.

FINE and BARTHOLOMEW (1946) determined the fates of the phosphorus added to plots treated over a 25 year period, with superphosphate and a Tennessee rock phosphate. They observed increases in total P_2O_5 for all the mechanical separates and found 120 and 166 p.p.m. more P_2O_5 in the treated plot with rock phosphate than with the superphosphate and check plots respectively. On the basis of indications given by solubility tests made (Truog's method), about 60 p. 100 of this increase could be accounted for by persistence of rock phosphate grains. They confirmed this last finding by microscopic observation, further stating that under the conditions of their experiment about 120 pounds of P_2O_5 per acre were fixed in the clay fraction of both the rock and superphosphate treated plots.

WEEKS and MILLER (1948) used soils from five long-established experiment fields in Kentucky. The locations chosen were representative of extensive areas of low-phosphate soils in the state. Rotations of corn, wheat and mixed grasses and legumes were used. Lime and manure had been applied. Sixteen percent superphosphate and 32 p. 100 rock phosphate had also been applied at different rates in each rotation. The phosphates applications were then discontinued on half of some plots and the residual effects of phosphates evaluated. They reported that, during the approximately 16 years following the discontinuance, yields of all crops had gradually decreased for all plots where superphosphates were used. For the rock phosphate plots, however, after 16 years, no appreciable decrease in yields occured. They stated that for the rock phosphate plots sufficient phosphorus had been built up so that even after 16 years, even though the available supply was declining, it still was sufficient to meet crop needs.

MOSCHLER *et al.* (1957) reported comparisons of the quantities and availabilities of residual phosphorus resulting from equivalent (total P_2O_5) annual applications of rock phosphate and superphosphate over a 40 year period, and the distribution of the residual phosphorus among the sand, silt and clay fractions of the soil. The distribution was determined by phosphorus extractions and confirmed by X-ray analysis. They found that the availability of residual phosphorus from long-time superphosphate applications to Groseclose silt loam exceeded that of rock phosphate. Based on A values, residual phosphorus from superphosphate was approximately four times more available than that from rock phosphate. Based on total, Truog, and $NaHCO_3$-soluble phosphorus they showed : 1) more of the superphosphate had reacted with the soil than rock phosphate ; 2) more of the phosphorus applied as superphosphate had accumulated in the silt and clay fractions of the soil and based on solubility in $NaHCO_2$ was more relatively available ; and 3) more of the phosphorus applied as rock phosphate had accumulated in the sand fraction of the soil and was relatively unavailable, as judged by solubility in $NaHCO_2$. Further, they stated

that apparently some of the rock phosphate had not reacted with the soil and was still in its original molecular combination. X-ray analysis revealed the presence of apatite or a mineral similar to apatite in the sand fraction of soil that had received rock phosphate. They found that approximately three-quarters of the total phosphorus applied over a 40-year period from either source remained as residual phosphorus.

LEHR and BROWN (1958) from a petrographic study of the alterations of some calcium phosphate fertilizers in soil, including hydroxy apatite, found no evidence of marked dissolution of hydroxy apatite which did not appear to have been altered physically or chemically.

DOLL *et al.* (1960) evaluated the relative residual effects of rock phosphate and superphosphate on Kentucky soils. They showed by means of total phosphorus analysis that much of the phosphorus added as rock phosphate on both rock phosphate and rock phosphate residual plots in the long time experiments was still present as particles of rock phosphate after 12 and 18 years.

JOHN (1962) made a study of the accumulation, movement, distribution and chemical changes in soil phosphorus in the plots of a long-term fertilizer trial at the Illinois Soil Experiment Field at Aledo. The phosphorus treatments had been residual for 36 years for one plot and 19 years for 2 plots. His results indicated that all the applied phosphorus, irrespective of form applied, remained in the 0 to 9 inch depth, and that the differences in the amounts of phosphorus between plots at this depth were due to P^- treatments. Fractionation results indicated that rock phosphate additions significantly increased the aluminum-, iron-, and calcium-bonded phosphorus. He calculated, assuming that the increases in calcium-bonded phosphorus content represented the phosphorus remaining as residual rock phosphate, that after 19 years and 36 years, 56.7 and 86.0 p. 100 respectively of the total rock phosphate applied remained unaltered. He attributed the differences in dissolution rates to the liming schedule. Differences in the transformation rates into Al-P and Fe-P fractions between plots were also ascribed mainly to the different rates of liming.

CHU *et al.* (1962) investigated the rock phosphate transformations in acid soils. Aluminum-bound and iron-bound phosphates were found to be the end-products of the reaction of the rock phosphate with soil. The free iron content also influenced the extent to which iron-bound phosphate were formed. In soils having a high iron content, rock-phosphate decomposition increased due to the more effective removal of H_2PO_4 ions from the soil solution by iron compounds. They found that the amount of phosphate rock which reacts is not necessarily related to the time after application. In all their experiments, a definite relationship existed between soil acidity and iron content on one hand and per cent rock-phosphate decomposed and Fe-phosphate/Al-phosphate ratio on the other.

MANNING and SALOMON (1965) studied the forms of phosphorus in soils from long-time fertility experimental plots at the Rhode Island Agricultural Experiment Station. The forms of P after 50 and 70 years of phosphate fertilization (superphosphate and rock phosphate treatments) were obtained by the fractionation method of CHANG and JACKSON (1957). The results showed that superphosphate treatments increased the Al-P fraction, and Fe-P and Ca-P fractions to a lesser degree. Rock phosphate treatments increased the calcium-P fraction substantially and the Al-P fraction to a lesser degree. Occluded and organic phosphate fractions were not greatly affected by various levels and sources of applied phosphate. They reported that

higher percentages of Al-P were extracted (47 p. 100 to 66 p. 100) than where rock phosphate had been applied (26 p. 100 to 39 p. 100). They also noted that much of the undissolved apatite (rock phosphate) which is solubilized by the acid Truog solution, remained in the soil.

ROBERTSON *et al.* (1966) studied the fate of applied P for two soils of Florida high in Al and Fe utilizing the revised P fractionation scheme of CHANG and JACKSON (1957). Single applications of concentrated superphosphate and rock phosphate up to 175 and 340 pounds of P per acre were made to a loamy fine sand and corn was used as an indicator crop.

After two years they found that there was 4.1 and 1.5 times more Al-P and Fe-P respectively in the soil following concentrated superphosphate treatment than in the soil receiving the rock phosphate treatment. They stated that the relatively high values for Ca-P for the rock phosphate treatments indicated that much of the rock phosphate had not dissolved. They further showed that rock phosphate was less available than superphosphate using P^{32} with plant uptake data.

It is evident from the literature cited that, under acid soil conditions rock phosphate is undergoing a slow rate of dissolution. Perhaps this rate is faster than has been realized. It has also been shown that the dissolution end products have substantially increased the content of the more labile Al- and Fe-P fractions. Although the rate of dissolution of rock phosphate can be expected to vary as a function of pH and other factors none of the workers cited attempted to evaluate or to interpret the average dissolution rate of rock phosphate in the soil. An attempt will be made to secure such information in the present investigation.

II. — MATERIALS AND METHODS

A. — *Cropping and Treatment Patterns of the Morrow Plots*

The Morrow Plots located on the University of Illinois campus represent the oldest experiment field in America. Established in 1876, they were initially designed primarily to study the effects of different cropping systems on the rate of soil depletion. By 1900 it was evident that the productivity of the soil, representative of vast areas of eastcentral Illinois, could not be maintained solely by crop rotations involving the use of legumes. Accordingly, each of the three previously establised rotations were split, the north half remaining as originally designed, the south half receiving manure, lime and phosphates. The phosphate treatments consisted of bone meal applied to the east half and rock phosphate applied to the west half of the treated areas. The west half (rock phosphate treated) was further split in 1954 at which time a uniform and high rate of N, P, K fertilizers were superimposed as a strip across both the treated and untreated areas. Individual corn yields for the initial effects of the 1954 modification compared to the long-term-previous treatments are summarized in Illinois Circular 777 (1957).

The experimental lay-out of the present plots is shown in figure 1. The three cropping systems followed are :

1. continuous corn since 1876 on Block 3,
2. a two-year corn-oats (catch legume) rotation on Block 4,
3. and a three-year corn-oats-red clover rotation on Block 5.

Since 1904, all grain, straw, stalks and hay have been removed. Stubble and roots have been the only crop residues returned to the plots. Manure, however, has been applied to the treated plots. From 1904 to 1909 this was applied at the rate of two tons per acre. Since then, the manure added has been equal to the air-dry weight of the crops removed. The manure has always been applied before the corn crop. The schedule of limestone and rock phosphate (Tennessee Brown) treatments applied following the 1904 modification is given in table 1.

TABLE I

The Amounts of Limestone and Rock Phosphate Applied to the Treated Morrow Plots, Beginning in 1904

Quantités de chaux et de phosphates naturels appliquées aux parcelles Morrow à partir de 1904

Time of Application	Plot 3 SW		Plot 4 SW		Plot 5 SW	
	*r*P	L	*r*P	L	*r*P	L
	lbs./acre		lbs./acre		lbs./acre	
Spring, 1904	—	—	—	—	1 768	—
« Late Fall », 1904	1 102	1 704	1 102	1 704	—	1 704
December, 1906	1 100	—	1 100	—	1 850	—
November 21, 1908	1 856	—	1 856	—	—	—
December 2, 1909	—	—	—	—	1 590	—
« Winter », 1910	650	—	650	—	—	—
November, 1912	1 292	—	1 292	—	1 992	—
November 25, 1914	1 200	—	1 200	—	—	—
March 24, 1916	—	—	—	—	1 800	—
March 2, 1917	1 200	—	1 200	—	—	—
April 18, 1919	4 800	10 000	4 800	10 000	4 200	10 000
— 1943	—	6 000	—	6 000	—	6 000
— 1955	—	4 000	—	4 000	—	4 000
— 1963	—	6 000	—	6 000	—	6 000
Total Applied	13 200	27 704	13 200	27 704	13 200	27 704

TABLE 2

Morrow Plots Samples Used and Their Corresponding S Numbers of the Department of Agronomy Soil Samples Collection

Échantillons des parcelles Morrow utilisés avec leurs numéros de la collection d'échantillons de sols du département d'Agronomie de l'Université de l'Illinois

Year	1923	1933	1944	1949	1953	1955	1961	1965 (1)
Plot								
3 NW	3 292	9 456	13 418	17 085	19 962	20 509	26 394	M.C. 3 NW
3 SW	3 298	9 468	13 412	17 081	19 964	20 511	26 406	M.C. 3 SW
4 NW	3 304	9 484	13 406	17 089	19 966	20 513	26 418	
4 SW	3 310	9 492	13 400	17 091	19 968	20 515	26 430	
5 NW	3 316	9 504	13 394	17 093	19 970	20 517	26 442	
5 SW	3 322	9 516	13 388	17 095	19 972	20 519	26 454	

(1) No S numbers were assigned to this year. These samples were not a part of the official sampling.

B. — *Soil samples studied*

The soil of the Morrow Plots is classified as Flanagan silt loam, a Prairie or Brunizem soil which by the 7th Approximation (Soil Survey Staff, SCA, USDA, 1960) is classified as an Aquic Argiudoll. The soil samples used in this study are those from the collection of the Department of Agronomy collected during the 1923-1965 period for the plots prefixed 3 and the 1923-1961 period for the plots prefixed 4 and 5. Only the surface horizon samples were used since it has been shown by other workers that, in general, rock phosphate particles, for soils of similar texture, are not translocated to greater depths than that achieved through tillage operations (De Turk, 1938 ; John, 1962). A listing of the samples and their corresponding numbers is given in table 2.

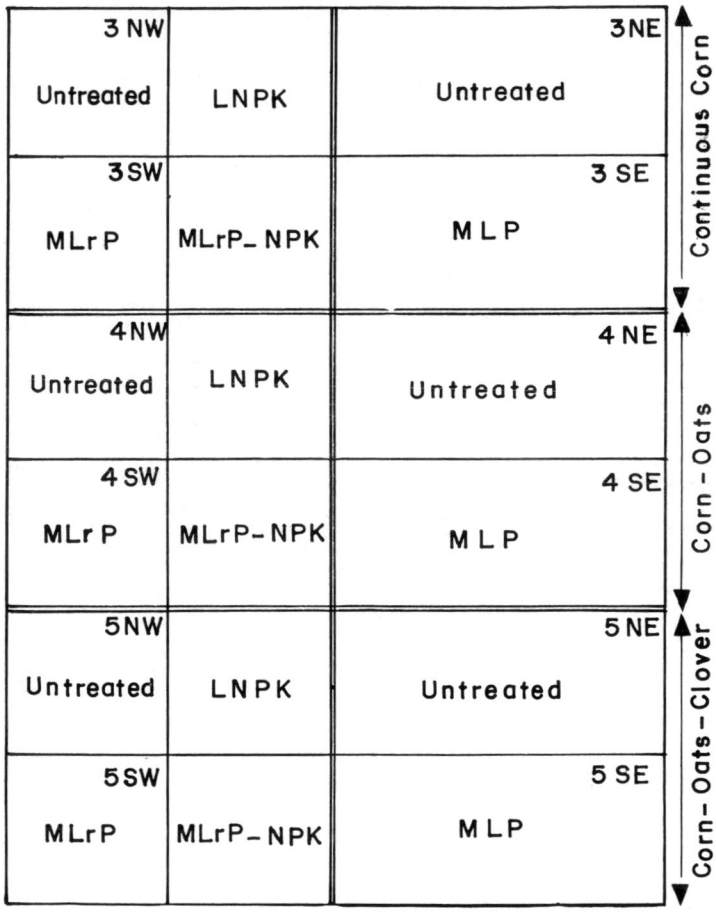


Fig. 1. — *Lay-out of the Morrow Plots as of 1965*
(for the treatments : M = manure, L = lime, N = nitrogen, P = phosphorus, K = potassium, *r*P = rock phosphate)

Plan des parcelles Morrow en date de 1965
(pour les traitements : M = fumier, L = pierre à chaux, N = azote, P = phosphore, K = potasse, *r*P = phosphate naturel)

C. — *Particle size separation*

To establish the distribution of the rock phosphate particles in the various mechanical soil fractions, two procedures were employed. First, the sand, silt and clay content of the soil samples were determined by the mechanical analysis procedure outlined by DAY (1965). Second, since the DAY procedure employed sodium metaphosphate as a dispersing agent, this introduces phosphates which would obviously contaminate the mechanical separates for any further phosphate studies. Consequently a combination of screening, trituration, ultrasonic treatment and sedimentation involving no dispersing agent was adopted. This consisted of shaking for 1 hour 20 gm of soil in 200 ml of deionized water in glass bottles on a reciprocating shaker. The sand fraction ($> 50\ \mu$) was removed by wet screening (300 mesh screen) and washing, after which the sands were further triturated with a rubber pestle to break down the remaining aggregates. This process was continued until it was obvious that the residues remaining on the screen represented the sand fraction only. The silt and clay fractions which passed through the screen was then subjected to ultrasonic vibration (20 minutes) for further breakdown of micro-aggregates. The clay size fractions ($< 2\ \mu$) was separated from the silt by repeated centrifugation according to the procedure of TANNER and JACKSON (1948). The separation was considered complete when the centrifugates were clear. The silt fraction (2-50 μ) was further divided into fine silt (2-20 μ) and coarse silt (20-50 μ) fractions. This separation was made by further ultrasonic treatment of the bulk silt fraction and centrifugal sedimentation according to the procedure of TANNER and JACKSON (1948). All separates including the water used in their separation, were collected in 1 liter beakers and dried on a hot plate at a temperature below the boiling point of water.

D. — *Chemical analysis*

Soil reaction was determined using a 1:1 soil/water suspension with a pH meter employing a glass electrode.

Total phosphorus was determined on perchloric acid digestates by an acid free molybdovanadate procedure outlined by TANDON *et al.* (1968).

The BRAY and KURTZ (1945) P_1 values, called Bray-P_1 for convenience, were obtained by the method described by LAVERTY (1963).

Phosphorus fractionation was carried out by the CHANG and JACKSON (1957) procedure as modified by PETERSEN and COREY (1966). Because of the large rock phosphate treatment, two extractions were made for the Ca bound phosphate fractions.

Isotopically exchangeable phosphorus was determined as follows : a 2.00 p.p.m. P solution was prepared by diluting a 50 p.p.m. P stock solution made from KH_2PO_4. The diluted solution was tagged with sufficient carrier-free $H_3P^{32}O_4$ to give approximately 5,000 counts per minute per cc., and adjusted to pH 7.0 with 1 *N* NaOH and made up to 1 liter. A 0.5 gm sample taken from the soil sample collection was shaken with 25 ml of the tagged solution for 24 hours on a reciprocating shaker. The suspensions were then centrifuged for 10 minutes at 10,000 r.p.m. in a Sorvall high-speed centrifuge and the clear supernatant recovered. Radioactivity in the supernatant was determined by counting dried 1-ml aliquots on a flow-proportional counter. Inorganic P in the supernatant was determined by an adaptation of the ascorbic acid method of MURPHEY and RILEY (1962).

E. — *Statistical analysis*

For the three cropping systems, the changes with time of pH, total P, Al-P, Fe-P, reductant-P, Ca-P, Bray P_1, and isotopically exchangeable-P were analyzed according to the computer program of CARMER and MOTTO (1966). The program, although designed for instrument calibration, can however, be used to evaluate regression models for a given set of dependent (Y) and independent (X) variables.

The partitioning of the contribution of the various phosphate fractions present to the total isotopically exchangeable-P and the P extractable by the Illinois P_1 test was determined by stepwise regression in conjunction with multiple regression analysis according to computer programs available from the Biometry Section of the Department of Agronomy.

III. — RESULTS AND DISCUSSION

A. — *Trends in pH with treatment and time*

The trends in pH values with treatment and time are given in table 3 and illustrated in figure 2.

For the untreated plots (3 NW, 4 NW and 5 NW) no significant change in pH occurred during the period 1923 to 1961. The average pH values for this period were 4.94, 4.99 and 4.95 respectively.

TABLE 3

Summary of Individual pH Values (1:1 in Water) *For Selected Morrow Plots*

Valeurs du pH (rapport 1:1 dans l'eau) *pour les parcelles Morrow choisies*

	Plot					
Year	3 NW	4 NW	5 NW	3 SW	4 SW	4 SW
1923	4.90	5.00	4.95	6.25	6.40	6.25
1933	5.00	4.99	5.10	5.80	5.85	5.86
1944	4.97	4.87	4.87	5.73	5.55	5.65
1949	4.95	4.87	4.80	6.23	5.87	6.17
1953	4.85	5.07	4.85	6.45	6.15	6.37
1955	4.90	4.87	4.95	6.40	6.25	6.50
1957	5.00	5.10	4.95	6.60	6.40	6.60
1961	4.95	5.15	5.10	6.57	6.42	6.75
1965	4.90	—	—	6.72	—	—
Average	4.94	4.99	4.95			

For the treated plots which had received limestone the pH changes followed the schedule of applications (fig. 2). It is obvious that the 1 700 lb/A application made in 1904 had little effect on the pH values indicating that the main changes in pH came with the initiation of the heavy lime schedule starting in 1919. It is seen from the information of rock phosphate applications given in table 1 that the major portion of the rock phosphate had been applied in the 15 year unterval following 1904 when the pH of the treated plots was very near that of the untreated plots. Now the question may be raised of the influence of rock phosphate on pH. JOHN (1962) had shown that where plots had received limestone, neither 3,500 pounds per acre of superphosphate nor 8,000 or 14,000 pounds per acre of rock phosphate altered the pH of the Aledo plots to any significant extent. Since the dissolution rate of rock phosphate is strongly influenced by pH, it is possible that a very substantial amount had been weathered. This supposition tends to be confirmed by the rather high indexes of phosphorus availability measured in 1923.

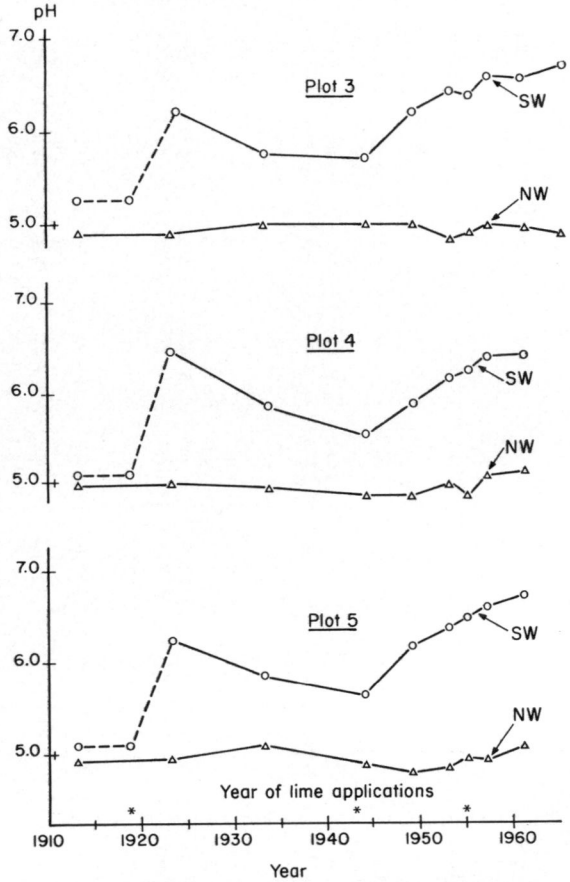


FIG. 2. — *Trends in pH Values with Treatment and Time*

Évolution du pH avec le traitement et le temps

B. — *Distribution of phosphorus in mechanical separates of untreated and rock phosphate treated plots*

The various particle size fractions obtained by trituration, ultrasonic dispersion, screening and sedimentation, and their corresponding total P contents are shown in table 4. The more or less uniform sand, silt and clay contents between the various samples is to be noted. Mechanical analysis for selected plots, performed by the U.S.D.A. procedure as outlined by DAY (1965) are given in table 4. It is evident that the separation procedure employed did not completely disperse the clay. The clay content in all cases was low, tending in particular to enrich the 20-50 μ fraction due probably to the clay contained in extremely stable micro-aggregates. The mechanical analysis of the Morrow Plots has been found to be uniform throughout the years (STAUFFER *et al.*, 1940).

Total phosphorus determined on the separate from the untreated samples indicated that the total P content increased with decreasing particle size. Without doubt

TABLE 4. — *Particle Size Distribution and Corresponding Total P Contents for Selected Morrow Plots*

Analyse granulométrique et teneur en P total des parcelles Morrow choisies

Fraction		Plot											
		3 NW		3 SW		4 NW		4 SW		5 NW		5 SW	
		%	Total P (p.p.m.)	%	Total P (p.p.m.)	%	Total P (p.p.m.)	%	Total P (p.p.m.)	%	Total P (p.p.m.)	%	Total P (p.p.m.)
1923	> 50 μ	9.59	103	10.07	2 685	6.59	75	8.68	1 951	9.46	100	9.28	2 994
	20-50 μ	46.29	220	49.00	661	48.78	179	50.96	682	41.69	229	41.27	469
	2-20 μ	34.84	533	33.11	1 000	33.84	584	31.86	1 153	36.57	538	36.92	869
	< 2 μ	8.13	1 203	6.88	2 510	7.87	1 304	5.82	2 560	8.42	1 201	6.58	2 196
		98.85		99.06		97.08		97.32		96.14		93.95	
1933	> 50 μ	9.29	139	7.64	3 136	7.50	140	10.20	1 782	8.29	117	7.25	2 892
	20-50 μ	67.54	230	45.79	759	49.42	182	47.32	584	45.72	267	47.07	499
	2-20 μ	35.74	520	37.10	877	33.51	545	31.53	1 057	37.37	525	35.02	852
	< 2 μ	6.35	1 097	8.53	2 095	8.02	1 319	7.40	2 345	6.53	1 163	10.39	2 025
		98.92		99.06		98.45		96.45		97.91		99.73	
1944	> 50 μ	11.20	119	9.57	1 756	10.93	166	12.66	1 327	9.96	84	9.15	2 385
	20-50 μ	45.17	224	46.79	542	41.07	116	41.72	427	42.80	224	43.26	473
	2-20 μ	34.02	495	35.08	930	35.27	538	33.59	905	37.64	514	39.18	888
	< 2 μ	6.23	1 066	5.50	2 393	9.62	1 355	9.40	2 144	8.41	1 078	7.11	2 103
		96.62		96.94		96.89		97.37		98.81		98.70	
1953	> 50 μ	8.62	326	11.0	1 290	9.76	130	11.98	1 252	10.00	100	8.60	1 907
	20-50 μ	46.76	150	45.18	405	44.60	212	45.58	432	42.50	193	42.80	410
	2-20 μ	35.03	427	34.55	803	35.68	567	32.60	905	36.40	420	37.60	742
	< 2 μ	7.86	961	6.60	1 968	8.37	1 231	8.36	2 041	10.70	1 097	10.80	1 768
		98.27		97.33		98.41		98.52		99.60		99.80	
					1961				*1961*				
1965	> 50 μ	13.01	123	9.72	1 746	9.14	134	12.05	932	10.63	105	8.67	1 977
	20-50 μ	42.93	183	43.67	390	42.37	193	41.13	395	41.80	132	43.14	407
	2-20 μ	34.98	431	37.77	794	35.68	527	34.11	835	34.91	476	37.69	789
	< 2 μ	9.06	1 081	9.02	2 005	9.49	1 264	9.70	1 916	10.27	1 139	9.39	1 687
		99.98		99.98		96.68		96.99		97.61		98.89	

the P content of the fine- and coarse-silt fractions has been enriched by P from the clay fraction contamination. Increasing P content with decreasing particle size has also been reported by WILLIAMS and SAUNDERS (1956) and MOSCHLER *et al.* (1957).

For the treated plots, the application of rock phosphate resulted in very large increases in the total P content of the sand-fractions, the least clay contaminated separate, followed by a rather substantial enrichment of the P content of the clay fraction. ALEXANDER and JACOB (1930) determined the mechanical analysis of finely divided natural phosphates representing commercial grades used in the 1930's. They reported 11.4 p. 100 by weight of the Tennessee Brown rock they analyzed to be smaller thant 2 μ in diameter in size for samples ground to pass a 100-mesh sieve.

Additions of such phosphate could indeed increase the total P content of the clay fraction. This enrichment of the clay fraction could have resulted from both clay size rock phosphate and P fixation products resulting from weathering of rock phosphate. In absence of confirming proof regarding the presence of rock phosphate in the clay, the variation in per cent P (1607 to 2560 p.p.m.) in the clay fraction suggests that there still may be considerable residual rock phosphate in the clay fraction. A general decrease in total P with time is observed for all particle size separates suggesting phosphorus removal from the fractions by weathering and P plant uptake.

In summary it has been shown that the total phosphorus content of the separates of untreated plots increased with decreasing particle size, that the rock phosphate treated plots separates exhibited important total P content increases in all fractions, the most important one occurring in the sand fraction followed by the clay fraction, fine-silt and coarse-silt fraction, respectively. A general decrease in total P in all fractions with time was observed and attributed to weathering and P plant uptake. The amounts of residual total P found in the rock phosphate treated plots suggest that a substantial amount of the rock is residual in all fractions particularly the sand and silt fractions.

C. — *Effect of rock phosphate treatment and lime on the total P content, P fractions, Bray P_1 and P^{32} exchangeable-P*

The effect of rock phosphate treatments and of lime applications on the total phosphorus content, P fractions, Bray P_1 and P^{32} exchangeable values were calculated for 1919, the last year of rock phosphate additions. Although the first sample was for 1923, trend analysis permits one to evaluate the phosphorus status for the last year of treatment. Trends were obtained by linear regression analysis and plotted as a function of time for the period 1919-1965 in figures 3, 4, 5, 6, 7, 8 and 9. Correlation coefficients and best fitting curve equations are indicated on the graphs.

Total P content decreases significantly with time in all cases. For two of the untreated plots (3 NW and 5 NW) the changes are significant at the 5 p. 100 level. The slope in total P decrease is much greater, however, for the treated than for the untreated plots indicating a proportionately greater loss in total P for the former. Assuming no P leaching losses, this represents the additional removal which has accompanied higher yields on the treated plots, as will be shown later.

Al-P values decreased with time in all cases. It is to be noted, that although there is some variation in slopes among the plots, the decrease with time is greater

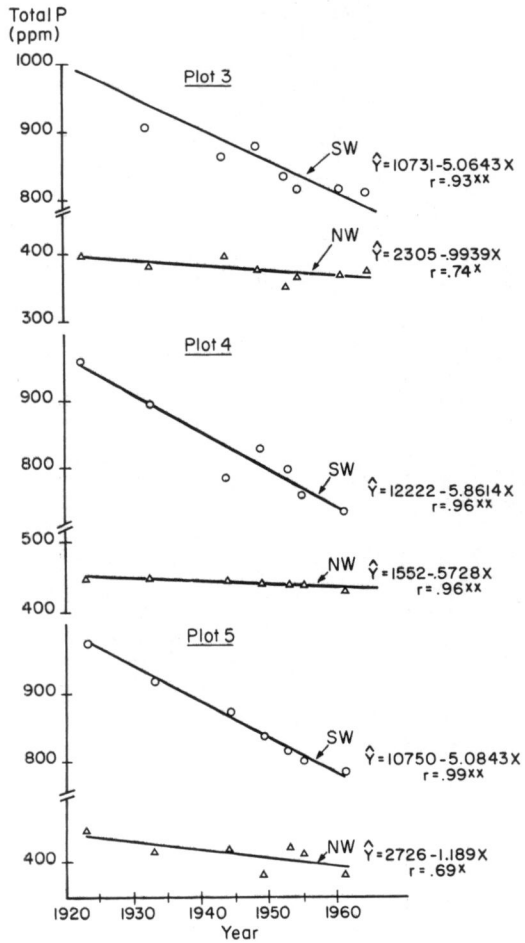


FIG. 3. — *Trends in Total P Content with Time after 1919 for Selected Morrow Plots*

Évolution de la teneur en P total après 1919 pour les parcelles Morrow

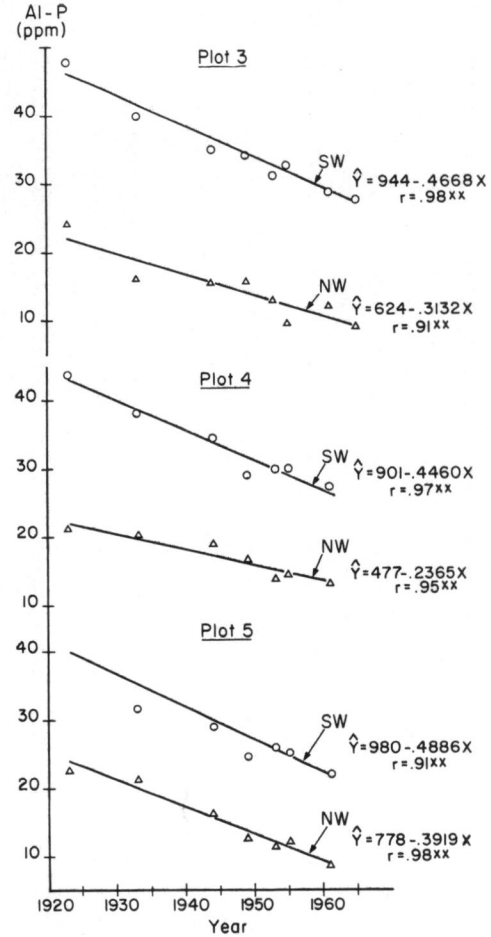


FIG. 4. — *Trends in Al-P Content with Time after 1919 for Selected Morrow Plots*

Évolution de la teneur en P-Al après 1919 pour les parcelles Morrow

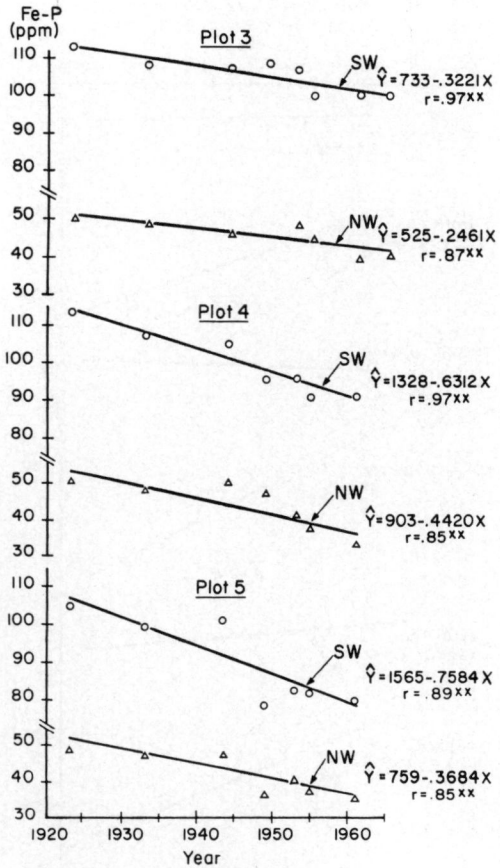


FIG. 5. — *Trends in Fe-P Content with Time after 1919 for Selected Morrow Plots*

Évolution de la teneur en P-Fe après 1919 pour les parcelles Morrow

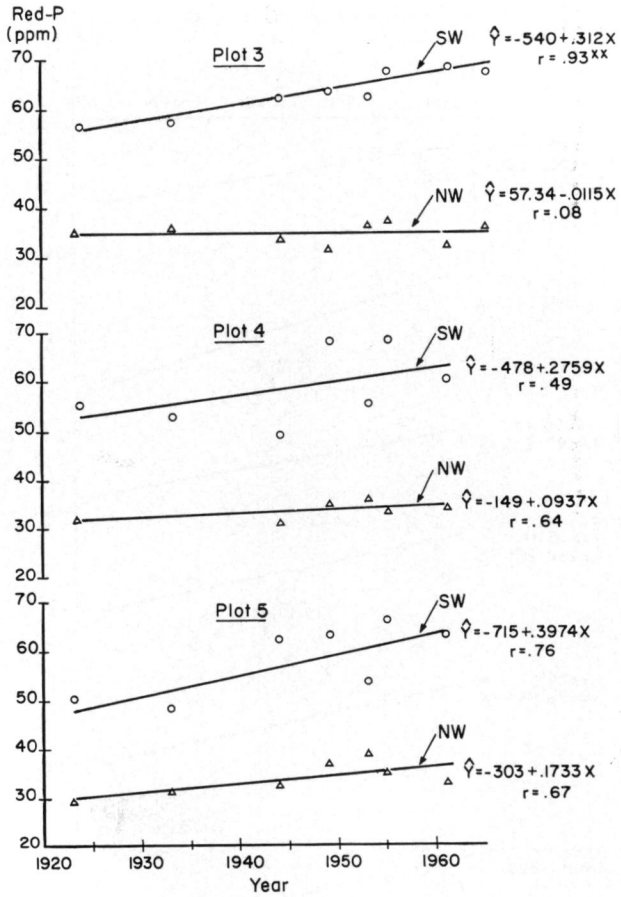


FIG. 6. — *Trends in Red-P Content with Time after 1919 for Selected Morrow Plots*

Évolution de la teneur en P-Red après 1919 pour les parcelles Morrow

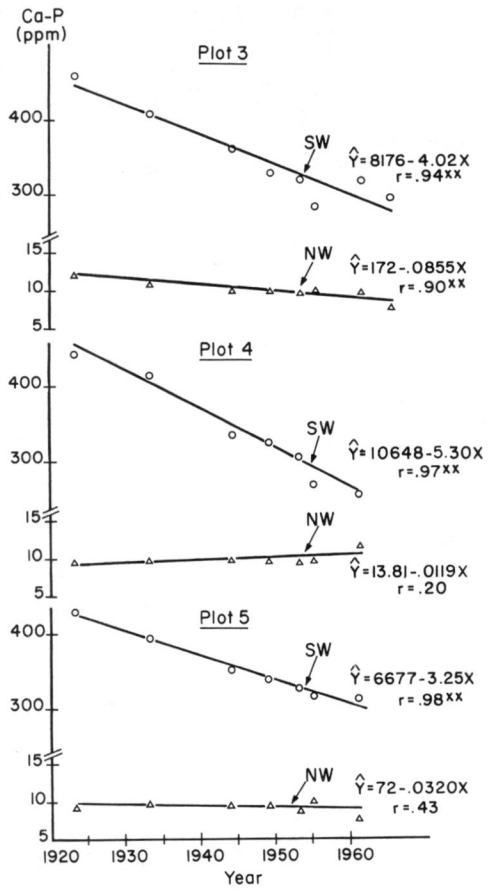


FIG. 7. — *Trends in Ca-P Content with Time after 1919 for Selected Morrow Plots*

Évolution de la teneur en P-Ca après 1919 pour les parcelles Morrow

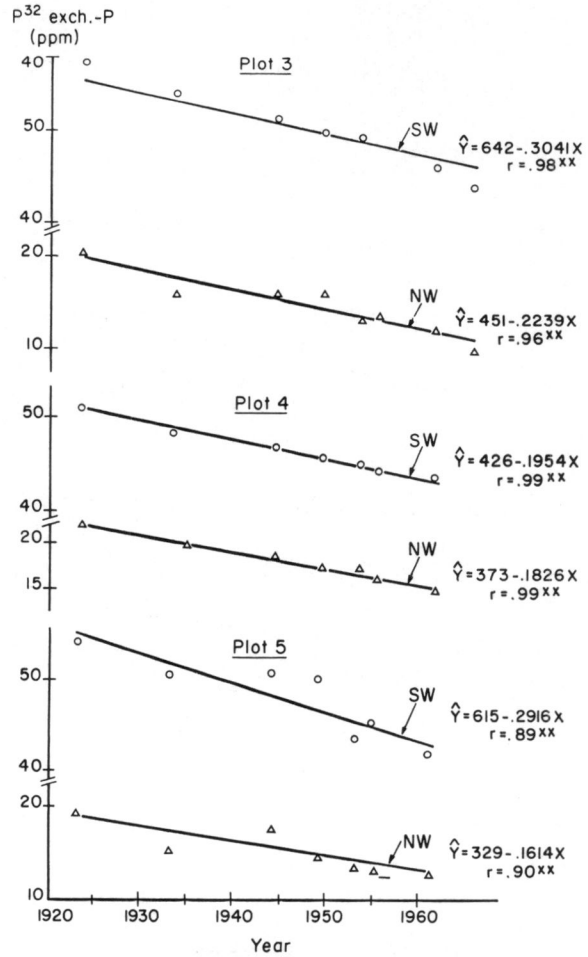


FIG. 8. — *Trends in P^{32} Exchangeable-P Values with Time after 1919 for Selected Morrow Plots*

Évolution des valeurs de P^{32} échangeable après 1919 pour les parcelles Morrow

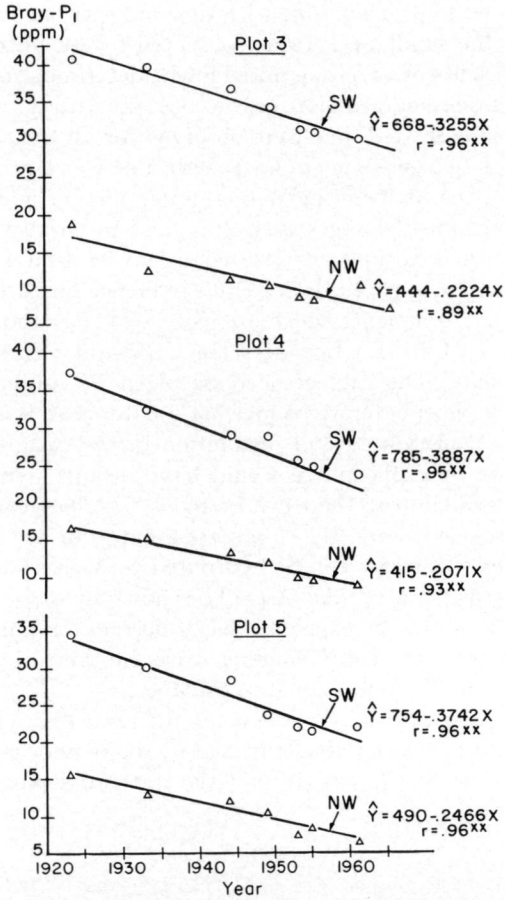


FIG. 9. — *Trends in Bray P_1 Values with Time after 1919 for Selected Morrow Plots*

Évolution des valeurs de Bray-P_1 après 1919 pour les parcelles Morrow

for the treated than for the untreated plots. On the average, the Fe-P fraction decreased more rapidly with time than the Al-P fraction.

Al-P and Fe-P decreases with time suggest P removal by plants at a greater rate than their formation following rock phosphate dissolution. HSU and JACKSON (1960) and MACKENZIE (1962) from combined P^{32} and fractionation studies have concluded that Al-P has the higher specific activity. The trend analysis data, illustrated for Al-P and Fe-P, would suggest however that both fractions have essentially the same availability.

No change with time in Red-P was observed for any of the untreated plots. Only in one case (3 SW), there was a significant increase in Red-P with time. It is generally believed that accumulation of Red-P takes long periods of time, therefore any trends would not be expected to be observed for the short period of time with which this study is concerned. The significance observed for plot 3 SW is probably fortuitous.

Ca-P was observed to be decreasing with time only for one of the untreated plots (3 NW). Because of the small Ca-P values observed for all untreated plots and the relatively high coefficients of variation noted in the determinations of Ca-P, it would appear that this fraction remained more or less constant with time. On the other hand, highly significant changes with time were observed for all treated plots. It is to be noted that the rate of change (slope) of Ca-P with time was on the average about ten times greater than for the Al-P and Fe-P fractions and only slightly less than that for the total-P slope. Calcium P changes with time tend to parallel the total P content decreases. There is no indication that Ca-P changes with time had been affected by the lime applications. The apparent lack of lime influence probably results from areas of micro-weathering environments which are more acid than those indicated by bulk pH measurements. The Ca-P fraction decreases represent changes with time in the residual rock phosphate. The rate of decrease of Ca-P, equivalent to the rate of disappearance of rock phosphate, was somewhat greater than it is usually believed to be. If one assumes a constant rate of dissolution in the future, the trend analysis indicates that all the rock phosphate would have disappeared by the year 2010!

The indexes of availability, the Bray P_1 and P^{32} exchangeable-P also decreased with time. In all cases, as before, the slopes are greater for the treated than for the untreated plots. These decreases can be attributed to declines in individual P fractions and to phosphorus plant uptake. As will be shown by stepwise regression analysis it would appear that the P^{32} exchangeable-P decrease is largely associated with a decline in the Ca-P fraction. The average increases, obtained by substraction of the values of the treated plots are presented in table 5.

The average increase in total P content for 1919 was 562 p.p.m. P. The average increase which would have been induced by the 13,200 pounds per acre of rock phosphate should have been 670 p.p.m. P over the untreated plots if the phosphorus

TABLE 5

Increases in Total P, P Fractions, P^{32} Exchang.-P and Bray P_1 Values due to Lime and Phosphorus Treatments as Calculated for 1919

Augmentations du P total, des composantes du fractionnement du P, du P^{32} échangeable et des valeurs du Bray P_1 dues aux traitements avec de la chaux et des phosphates naturels calculés pour l'année 1919

	3 SW (p.p.m.)	4 SW (p.p.m.)	5 SW (p.p.m.)	Average (p.p.m.)
Total P	615	521	550	562
Al-P	25	22	17	21
Fe-P	63	63	58	61
Red-P	20	20	19	20
Ca-P	451	465	429	448
Total Fractions P	559	570	523	
P^{32} exchang.-P	38	28	37	34
Bray-P_1	26	21	19	22

content of the rock phosphate is taken as 11.6 p. 100 P. The lower figure (563 p.p.m.) probably represents experimental error arising from sampling and/or crop removal during the period 1904 to 1919.

Increases in aluminum bonded-P and iron bonded-P occurred for plots treated with rock phosphate. By 1919, considerable rock phosphate had reacted with the soil building up significant amounts of both Al- and Fe- phosphates. Rock phosphate applications have increased the Al-P and Fe-P content over that present in the untreated plots by an average of 22 and 61 p.p.m. P respectively, almost doubling the Al-P and Fe-P contents over that present in the untreated plots. Such increases have also been reported by JOHN (1962), MANNING and SALOMON (1965) and ROBERTSON *et al.* (1966). In a study of several Virginia acid soils, CHU *et al.* (1962) showed that the rock phosphate breakdown into Al-P and Fe-P decreased with increasing pH. They further found that the relationship between pH and Al-phosphate was essentially the same for all soils studied, whereas the amount of Fe-phosphate form varied both with pH and soil free iron oxides content.

Rock phosphate transformations in soils occur in two steps, namely the dissolution and fixation of the soluble products. Once $H_2PO_4^-$ ions are liberated into soil solution they may react with soluble Al^{+3} and Fe^{+3} ions and/or the free oxides of Al and Fe.

As has been shown by HSU and JACKSON (1960) and CHU *et al.* (1962), the inorganic phosphate transformations in soils are mainly pH dependent. Al-bonded P and Fe-P bonded P are the products of reaction of phosphate ions in acid soils. It is probable from consideration of the pH effect, that the rate-limiting reaction is that of rock phosphate dissolution and that Al- and/or Fe-phosphates are formed almost immediately thereafter.

Although the data indicate an increase in reductant-soluble phosphorus this probably is not significant.

The average increase in calcium-bonded P was 448.3 p.p.m. P. This represents the greatest increase in any P fraction. The high amounts of Ca-bonded phosphorus indicates that considerable phosphorus remains as rock phosphate. Others have reached similar conclusions. FINE and BARTHOLOMEW (1946) have reported that rock phosphate particles persisted in a Red Podzolic soil for at least 25 years. MOSCHLER *et al.* (1957) have shown that particles of rock phosphates persisted for at least 40 years in Croseclose silt loam. DOLL *et al.* (1960) utilizing an acid extraction for P indicated that much of the phosphorus added as rock phosphate was still present as particles of rock phosphates after 12 and 18 years. JOHN (1962) found high amounts of calcium-bonded phosphorus in the rock phosphate treated plots suggesting that a substantial part of the phosphorus applied had persisted as rock phosphate. ROBERTSON *et al.* (1966) also found high values for Ca-P for rock phosphate treatments after 12 years indicating again that all rock phosphate was not dissolved. PERKOVIC and KOVACEVIC-TATIC (1967) have shown that North African rock phosphate increased Ca-P considerably.

Increases in Bray P_1 values were observed for all treated plots. These increases follow the changes observed for Al-bonded phosphorus.

Increases in P^{32} exchangeable-P values are much larger than those of Bray P_1. These can be accounted for on the basis of increases in Al-P, Fe-P and Ca-P fractions. It is known that the activity of Al- and Fe-P is much greater than the activity of

Ca-P (CHU and CHANG, 1966). The average value of the P^{32} exchangeable-P for five samples of the Agronomy Department collection of Tennessee rock phosphates was found to be 512 p.p.m. Taking 11.6 p. 100 as the average total P content of rock phosphate it was calculated that the rock phosphate applied (6.6 Tons/A) would only contribute 3.65 p.p.m. to the labile P pool representing only 10 p. 100 of the P^{32} exchangeable-P measured.

This discrepancy in the apparent activities of pure rock phosphate and rock phosphate in contact with the soil would indicate that such comparisons are not valid. As it will be shown, in a later section, by stepwise regression analysis, the increases in P^{32} exchangeable-P for the most part, can be accounted for on the basis of the activity resulting from the residual rock phosphate activity.

In summary, the increases in the active Al-P, Fe-P, Bray P_1 extraction values all indicate a considerable dissolution of rock phosphate had occurred during the 1904-1919 period when the soils were relatively acid in reaction. The increase in P^{32} exchangeable-P, with data presented later, indicate that the rock phosphate was contributing to the labile phosphorus pool.

D. — *Fate of the applied rock phosphate*

In order to assess the fate of the applied rock phosphate, the total P content decreases were compared to phosphorus plant uptake for the 3 NW, 3 SW, 4 NW and 4 SW plots. The balance sheet given in tables 7 and 8 was evaluated for the

TABLE 6

Summary of Total Crop Yields per Acre for the 3 NW, 3 SW, 4 NW and 4 SW Plots

Rendements totaux des récoltes des parcelles 3 NW, 3 SW, 4 NW et 4 SW (par acre)

Plot	Period	Crop and Unit of Yield	Yield	Residues Removed
3 NW	1920-1965	Corn		
		bu/A	1 076.4	—
		tons/A	—	25.61
3 SW	1920-1965	Corn		
		bu/A	2 552.7	—
		tons/A	—	60.75
4 NW	1920-1958	Corn		
		bu/A	631.4	—
		tons/A	—	15.02
		Oats		
		bu/A	643.4	—
		tons/A	—	9.76
4 SW	1920-1958	Corn		
		bu/A	1 534.6	
		tons/A	—	36.55
		Oats		
		bu/A	1 288.3	—
		tons/A	—	19.58

TABLE 7

Phosphorus Removed by Crops Grown on the 3 NW, 4 NW, 3 SW and 4 SW Plots

Exportations de phosphore par les récoltes des parcelles 3 NW, 4 NW, 3 SW et 4 SW

Plots	Period	P Removed by Plant Uptake (1) (p.p.m.)
3 NW	1920-1965	115.5
3 SW	1920-1965	275.6
4 NW	1920-1958	114.6
4 SW	1920-1958	255.4

(1) Phosphorus composition values employed : corn grain, 0.29 p. 100 P ; corn stover, 0.11 p. 100 P ; oat grain, 0.36 p. 100 P ; and oat straw 0.1 p. 100 P

TABLE 8

Phosphorus Losses from the 3 NW, 3 SW, 4 NW and 4 SW Plots as Evaluated from the Regression Equations

Pertes en phosphore des parcelles 3 NW, 3 SW, 4 NW et 4 SW évaluées d'après les équations de régression

Period	P Form	Plot	
		3 NW (p.p.m.)	3 SW (p.p.m.)
1919-1965	Total P	— 45	— 233
	Al-P	— 14	— 18
	Fe-P	— 11	— 7
	Red-P	0	12
	Ca-P	— 4	— 185
	Total P Fractions	— 29	— 198
		4 NW (p.p.m.)	4 SW (p.p.m.)
1919-1958	Total P	— 23	— 229
	Al-P	— 11	— 17
	Fe-P	— 20	— 25
	Red-P	4	9
	Ca-P	1	— 206
	Total P Fractions	— 26	— 239

period 1920-1965 for the 3 NW and 3 SW plots, and 1920-1958 for the 4 NW and 4 SW plots. A balance sheet was not calculated for the 5 SW and 5 NW plots because of the uncertainties in hay yields. The total P plant uptake calculated from crop yields (table 6) available in the files of the Department of Agronomy and using average percentage composition of crops as given by JOHN (1962) is shown in table 7. A summary of the total phosphorus losses from the various P fractions as evaluated from the regression equations are given in table 8. From these calculations the following conclusions can be drawn :

1. Total P content decreases for the untreated plots, as evaluated by regression equations, represent only a fraction of the phosphorus uptake by crops (45 vs 115 p.p.m, 23 vs 114.6 p.p.m.). Two reasons for this discrepancy are possible : *a*) with relatively small changes in total P content and a high sampling error, it is difficult to correctly assess the real decreases in total P ; *b*) it is probable that cropping losses from surface horizons represent only part of the total plant uptake of phosphorus from the root zone.

2. Decreases in total P content for the treated plots agree well with P removal by the crops (233 vs 275.6 p.p.m. and 229 vs. 255.4 p.p.m.) considering sampling errors and the fact that part of the root system probably draws P from the deeper horizons. GUERNSEY (1966) has shown the deep rooting habits for corn grown on the treated Morrow Plots.

TABLE 9

Correlation Coefficients (r) between P-Availability Indexes and P Fractions for the Untreated (NW) *Plots* ($n = 22$)

Coefficients de corrélation (r) entre les indices de disponibilité du phosphore et les formes inorganiques du phosphore pour les parcelles témoins (NW)

P^{32} — exchang. P vs. P fractions

Variable	P^{32} exch. P	Al-P	Fe-P	Red-P	Ca-P
P^{32} exch. P	1.000	.867**	.605**	— .431*	.426*
Al-P		1.000	.702**	— .557**	.520*
Fe-P			1.000	— .362	.320
Red-P				1.000	— .018
Ca-P					1.000

Bray P_1 vs. P fractions

Variable	P_1	Al-P	Fe-P	Red-P	Ca-P
P_1	1.000	.950**	.707**	— .484*	.545**
Al-P		1.000	.702**	— .557**	.520*
Fe-P			1.000	— .362	.320
Red-P				1.000	— .018
Ca-P					1.000

*, ** One and two asterisks refer to significance at the 5 and 1 p. 100 level of confidence.

3. From the decreases in the Al- and Fe-P fractions observed for the treated plots one may assume that these fractions disappear faster than they are replenished by rock phosphate dissolution. This disappearance is probably related to plant uptake. For the treated plots Ca-P losses represent most of the total P decrease.

E. — *Relationships between P availability indexes and P fractions as evaluated by stepwise regression analysis and multiple regression analysis*

To gain a better insight into primary P fractions contribution to the variation in the P^{32} exchangeable-P, simple correlation, multiple and stepwise regression were performed. TANDON *et al.* (1971) and TRIPATHI *et al.* (1968) have employed regression

TABLE 10

Correlation Coefficients (r) between P-Availability Indexes and P Fractions for the Treated (SW) *Plots* ($n = 21$)

Coefficients de corrélation (r) entre les indices de disponibilité du phosphore et les formes inorganiques du phosphore pour les parcelles traitées (SW)

P^{32} exchang. P vs. P fractions

Variable	P^{32} exchang. P	Al-P	Fe-P	Red-P	Ca-P
P^{32} exch.-P	1.000	.794**	.669**	— .362	.825**
Al-P		1.000	.817**	— .506*	.845**
Fe-P			1.000	— .296	.602**
Red-P				1.000	— .579**
Ca-P					1.000

Bray-P_1 vs. P fractions

Variable	P_1	Al-P	Fe-P	Red-P	Ca-P
P_1	1.000	.873**	.917**	— .233	.734**
Al-P		1.000	.817**	— .506	.845**
Fe-P			1.000	— .296	.602**
Red-P				1.000	— .579**
Ca-P					1.000

*, ** One and two asterisks refer to significance at the 5 and 1 p. 100 level of confidence.

analysis particularly stepwise regression to partition the contribution of the various P fractions to variation in P^{32} exchangeable-P, Bray P_1 and Olsen values. Correlation coefficients between P availability indexes and P fractions for the treated (NW)

TABLE 11

Stepwise Regression Analysis for the Regression of P Availability Indexes on P Fractions for the Untreated (NW) *Plots* ($n = 22$)

Analyse de régression étape par étape des indices de disponibilité du phosphore par rapport aux formes inorganiques du phosphore des parcelles témoins (NW)

P fraction	Availability index	R^2	ΔR^2
	P^{32} exchang.-P		
Al-P		.7513**	
Al-P + Red-P		.7552	.0039
Al-P + Red-P + Ca-P		.7585	.0034
Al-P + Red-P + Ca-P + Fe-P		.7587	.0002
Total R^2		.7587**	
	Bray-P_1		
Al-P		.9017**	
Al-P + Ca-P		.9052	.0035
Al-P + Ca-P + Fe-P		.9090	.0037
Al-P + Ca-P + Fe-P + Red-P		.9098	.0009
Total R^2		.9098**	

** Two asterisks refer to significance at the 5 and 1 p. 100 level of confidence.

TABLE 12

Stepwise Regression Analysis for the Regression of P Availability Indexes on P Fractions for the Treated (SW) *Plots* ($n = 21$)

Analyse de régression étape par étape des indices de disponibilité du phosphore par rapport aux formes inorganiques du phosphore des parcelles traitées (SW)

P fraction	Availability index	R^2	ΔR^2
	P^{32} exchang.-P		
Ca-P		.6808**	
Ca-P + Fe-P		.7271	.046 3
Ca-P + Fe-P + Red-P		.7427	.015 6
Ca-P + Fe-P + Red-P + Al-P		.7457	.003 0
Total R^2		.7457**	
	Bray P_1		
Fe-P		.8403**	
Fe-P + Ca-P		.8924	.052 1**
Fe-P + Ca-P + Red-P		.9277	.035 3**
Fe-P + Ca-P + Red-P + Al-P		.9353	.007 6
Total R^2		.9353**	

** Two asterisks refer to significance at the 5 p. 100 level of confidence.

and untreated plots (SW) are shown in tables 9 and 10. Coefficients of multiple determination (R^2) obtained by stepwise regression analysis are given in tables 11 and 12. Standard partial regression coefficients are given in table 13.

TABLE 13

Standard Partial Regression Coefficients (S.P.R.C.) *for the Regression of Available P Indexes on P Fractions*

Coefficients de régression partiels standardisés pour la régression des indices de disponibilité du phosphore par rapport aux formes inorganiques du phosphore

Plots	P fraction	P availability index	
		P^{32} exchang.-P	Bray-P_1
NW			
	Al-P	.9789	.8814
	Fe-P	— .0202	.0827
	Red-P	.1056	.0382
	Ca-P	— .0752	.0601
SW			
	Al-P	.1488	.2390
	Fe-P	.1841	.6088
	Red-P	.1630	.2461
	Ca-P	.6827	.3079

For the untreated plots (3 NW, 4 NW and 5 NW) P^{32} exchangeable-P and Bray P_1 are highly correlated with Al-P, Fe-P and Ca-P. Red-P is negatively correlated with P^{32} exchangeable-P and Bray P_1.

Al-P is the main fraction extracted by the Bray P_1 test (TANDON, 1965). Therefore significant correlation is expected between the two values. Since all three fractions were positively correlated with P^{32} exchangeable-P and Bray P_1 values, the question arises as to which of these account for most of the variability in the P availability indexes. These can be estimated by stepwise regression. The results indicate that Al-P overwhelmingly contributes to the variation in P^{32} exchangeable-P and Bray P_1 values (75.13 p. 100 for P^{32} exchangeable-P and 90.17 p. 100 for Bray P_1). The other fractions combined, contributed less than 1 p. 100 of the variation.

To further assess the importance of the Al-P fraction, the relative lability of the different P fractions was estimated from the standard partial regression coefficients (SPRC). Al-P is shown to have the greatest lability from P^{32} exchangeable-P (.9789) and Bray P_1 (0.8814) values.

In summary it has been shown that the Al-P is the P fraction which contributes most to the pool of labile P. Moreover it was also shown that Al-P is the main fraction extracted by the Bray P_1 test. Other workers (SUSUKI *et al.*, 1963 ; PRATT and GARBER, 1964 ; PAYNE and HANNA, 1965 ; CHANG and JUO, 1963 ; and PECK, 1962) had arrived at the same conclusion.

For the treated plots (SW), P^{32} exchangeable-P and Bray P_1 were highly correlated with Al-P, Fe-P and Ca-P but not with Red-P. The high degree of correlation (.825) between P^{32} exchnageable-P and Ca-P is to be noted. However Bray P_1 values correlated best with Fe-P. When stepwise regression analysis was used to assess which of the P fractions accounted for most of the variability in the P availability indexes, with P^{32} exchangeable-P, the results indicated that Ca-P accounted for 68.08 p. 100 of the variability. Al-P and Fe-P accounted for 4.9 p. 100 only, Fe-P adding 4.6 p. 100 to the total variation followed by Al-P which accounted for 0.3 p. 100 of the total.

With the Bray P_1 test, Fe-P accounted for 84.0 p. 100 of the variation, Ca-P adding 5.2 p. 100 and Red-P and Al-P less than 4 p. 100 of the total. The latter results are surprising since the Bray P_1 is usually considered to be more-or-less a specific Al-P extractant (TANDON, 1965). The relative lability, as evaluated by the standard partial regression coefficients analysis, indicated values of 0.6827 for Ca-P, .1841 for Fe-P, .630 for Red-P and .1488 for Al-P when the regression analysis was performed with P^{32} exchangeable-P values, confirming stepwise regression results.

When the Bray P_1 values were taken, the standard partial regression coefficients were .6088 for Fe-P, .3079 for Ca-P, and .2390 for Al-P. It is interesting to note that the relative labilities were different for the P^{32} exchangeable-P and Bray P_1 methods. It would seem from the data that the capacity of exchange of rock phosphate in soils is greater than that measured on pure rock phosphate materials. The P^{32} exchangeable data suggest that Ca-P is the most labile form of P whereas the Bray P_1 method suggests that Fe-P is the most labile form for plots treated with rock phosphate! Bray P_1 is a very weak extractor of Ca-P. This perhaps accounts for the difference. From the phosphorus removal data by plants, P^{32} exchangeable-P seems to be the more reliable of the two methods for assessing the P availability status for the plots treated with rock phosphate.

Reçu pour publication en juillet 1976.

RÉSUMÉ

ÉVOLUTION DU PHOSPHATE NATUREL APPLIQUÉ AUX PARCELLES MORROW

Les parcelles Morrow, les plus vieilles parcelles expérimentales d'Amérique, offraient une opportunité unique pour étudier les effets et l'évolution à long terme de phosphates naturels appliqués à trois systèmes de culture. Les conclusions résumées tirées des résultats de cette recherche sont les suivantes :

1. Le pH des parcelles traitées aux phosphates naturels a augmenté suite aux applications de chaux. Aucun changement significatif du pH n'a eu lieu pour les parcelles témoins.
2. La teneur en phosphore total des classes granulométriques des parcelles non traitées augmente avec la finesse des particules. Toutes les fractions granulométriques isolées des parcelles traitées aux phosphates naturels ont eu des augmentations importantes en phosphore total (sable > argile > limon fin > limon grossier).
3. Les augmentations en P-Al, P-Fe, P-Ca, Bray P_1 et P^{32} échangeable sont dues aux applications de phosphates naturels.
4. Les teneurs en P total, P-Al, P-Fe, P-Ca, Bray P_1 et P^{32} échangeable ont toutes diminué avec le temps, les pentes des courbes étant plus grandes pour les parcelles traitées que pour les témoins.

5. Les valeurs du P^{32} échangeable suggèrent que le P-Ca est la forme la plus labile alors que les valeurs du Bray P_1 indiquent que P-Fe est la forme la plus labile pour les parcelles traitées aux phosphates naturels. Ce résultat surprenant est attribué au fait que le Bray P_1 est un extractif très faible de la forme P-Ca. D'après les exportations de phosphore par les plantes, il semblerait que le P^{32} échangeable soit la valeur la plus sûre pour déterminer la disponibilité du phosphore de parcelles traitées aux phosphates naturels.

ZUSAMMENFASSUNG

ENTWICKLUNG DEN MORROWSCHEN PARZELLEN ZUGEBRACHTEN NATÜRLICHEN PHOSPHATEN

Die Morrowschen Parzellen, die ältesten experimentellen Parzellen Amerikas, boten eine unvergleichliche Gelegenheit zum Studieren der Wirkungen und langfristiger Entwicklung der Zufuhr von natürlichen Phosphaten für drei kulturarten dar. Die aus den Untersuchungsergebnissen gezogenen Folgerungen werden zusammengefasst :

1. Der pH der Parzellen mit Zufuhr von natürlichen Phosphaten nimmt nach Kalkzufuhr zu. Keine wichtige pH-Schwankung findet auf die Kontrollparzellen statt.

2. Der Gehalt an Gesamtphosphor der Korngrössenbestimmungsklassen ungedüngter Parzellen steigt mit der Kornfeinheit. Alle die Korngrössen-bestimmungsfraktionen aus den mit natürlichen Phosphaten gedüngten Parzellen zeigen wichtige Zuhnahmen des Gesamtphosphors (Sand > Ton > Feinlchm > Groblehm).

3. Die Erhöhungen der Gehalten an austauschbaren P-Al, P-Fe, P-Ca, Bray P_1 und P^{32} kommen aus der Zufuhr von natürlichen Phosphaten.

4. Die Gehalten an austauschbaren gesamt P, P-Al, P-Fe, P-Ca, Bray- P_1 and P^{32} nahmen alle mit der Zeit ab ; die Kurvengefälle sind steiler für die behandelten Parzellen als für die Kontrollparzellen.

5. Die Werte von austauschbarem P^{32} erweisen dass P-Ca die labileste Form ist, während die Bray P_1 Werte zeigen dass P-Fe die labileste Form für die Parzellen mit Zufuhr von natürlichen Phosphaten ist. Dieses überraschende Ergebnis wird der Tatsache zugewiesen, dass Bray P_1 ein sehr schwaches Extrahierungsmittel der P-Ca Form ist. Nach der Phosphorentnahme durch die Pflanzen scheint es als ob austauschbarer P^{32} der sicherste Wert sei, um die Verfügbarkeit des in mit natürlichen Phosphaten gedüngten Parzellen vorhandenen Phosphors zu bestimmen.

РЕЗЮМЕ

Эволюция природных фосфатов при внесении их на делянки Морроу

М. П. ЦИСКАС, Е. Г. ТАЙНЕР.

Делянки Морроу — самые старые экспериментальные делянки Америки, являются отличным об' ективом для изучения эффектов долгосрочной эволюции примененных на трех различных типах культур природных фосфатов. Выводы из результатов этого исследования можно резюмировать следующим образом :

1. pH делянок обработанных с помощью природных фосфатов увеличивается при применении извести. Подобного увеличения не наблюдается на контрольных делянках.

2. Содержание общего фосфора в разных гранулометрических фракциях необработанных делянок увеличивается по мере уменьшения частичек. Во всех гранулометрических фракциях изолированных из обработанных природными фосфатами делянок содержание общего фосфора также увеличивается (песок > глина > легкий суглинок > крупный суглинок).

3. От применения природных фосфатов увеличиваются содержания P-Al, P-Fe, P-Ca, Брэй P_1 и обменного P^{32}.
4. Содержания общего P. P-Al, P-Fe, P-Ca, Брэй P_1 и обменного P^{32} уменьшаются со временем, причем падения кривых более резки в случае обрабатывавшихся делянок, чем в случае делянок контрольных.
5. Значения обменного P^{32} указывают на то что P-Ca является вообще наиболее лабильной формой, в то время как значения Брэй P_1 показывают что P-Fe представляет наиболее лабильную форму в случае делянок обрабатывавшихся природными фосфатами. Этот удивительный результат приписывается тому факту что Брэй P_1 является очень слабым экстрактором формы P-Ca. Если судить по количествам фосфора вынесенным растениями, то кажется, что применение обменного P^{32} является наиболее надежным способом для определения наличности фосфора в делянках обработанных с помощью природных фосфатов.

REFERENCES

ALEXANDER L. T., JACOB K. D., 1930. Mechanical analysis of finely divided natural phosphates. *U.S.D.A. Techn. Bul.*, n° 212.

ANONYMOUS, 1957. The Morrow Plots. *Univ. of Ill., Col. of Agr.*, cir. 777.

ARMIGER W. H., FRIED M., 1957. The plant availability of various sources of phosphate rock. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **21**, 183-188.

BARTHOLOMEW R. P., 1928. The unavailability of phosphorus in rock phosphate to some Southern crops. *J. Am. Soc. Agron.*, **20**, 913-920.

BARTHOLOMEW R. P., 1935. Fluorine, its effects on plant growth and its relation to the availability to plants of phosphorus in phosphate rock. *Soil Sci.*, **40**, 203-217.

BAUER F. C., 1920. The effect of leaching on the availibility of rock phosphate to corn. *Soil Sci.*, **9**, 235-251.

BAUER F. C., 1921. The relation of organic matter and the feeding power of plants to the utilization of rock phosphate. *Soil Sci.*, **12**, 12-41.

BEREZOVA E. F., OUVAROVA V. N., NESTEROVA G. N., NESTEROVA E. V., 1956. Utilisation des bactéries désintégrant le phosphate tricalcique pour l'amélioration de la nutrition phosphorée des plantes et l'augmentation de l'efficacité de l'engrais phosphaté pulvérulent. *Bull. Inf. Tech. Sci. Microbiol. Agric.*, 1, **18**, Leningrad.

BRAY R. H., KURTZ L. T., 1945. The determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, **59**, 39-45.

CARMER S. G., MOTTO M. L., 1966. A computer program for laboratory instrument calibration. *Agron. J.*, **58**, 462-463.

CARO J. H., HILL W. L., 1956. Characteristics and fertilizer value of phosphate rock from different fields. *J. Agr. Food Chem.*, **4**, 684-687.

CHANG S. C., JACKSON M. L., 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, **84**, 133-144.

CHANG S. C., JUO A. S. R., 1963. Available phosphorus in relation to forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, **95**, 91-96.

CHAVERRI J. G., BLACK C. A., 1966 *a*. Solubility of phosphate rock. *Soil Sci.*, **102**, 73-81.

CHAVERRI J. G., BLACK C. A., 1966 *b*. Theory of the solubility of phosphate rock. *Iowa State J. of Sci.*, **41**, 77-95.

CHU C. R., MOSCHLER W. W., THOMAS G. W., 1962. Rock phosphate transformations in acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **26**, 476-478.

CHU W. K., CHANG S. C., 1966. Surface activity of inorganic soil phosphorus. *Soil Sci.*, **101**, 459-464.

CONNER S. D., ADAMS J. E., 1926. Availability of Tennessee raw rock phosphate in relation to fineness and other factors. *J. Am. Soc. Agron.*, **18**, 1103-1107.

COOK R. L., 1935. Divergent influence of degree of base saturation of soils on the availability of native, soluble and rock phosphate. *J. Am. Soc. Agron.*, **27**, 297-311.

DAY P. R., 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. In « *Methods of Soil Analysis*, Part I » (C. A. Black, edt.-in chief.), 545-567.

De Turk E. E., 1938. Changes in the soils of the Morrow Plots which have accompanied long continued cropping. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **3**, 83-85.

Doll E. C., Miller H. F., Freeman J. F., 1960. Initial and residual effects of rock phosphate and superphosphate. *Agron. J.*, **52**, 247-250.

Drake M., Steckel J. E., 1955. Solubilization of soil and rock phosphate as related to root cation exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19**, 449-450.

Ellis R. Jr, Quader M. A., Truog E., 1955. Rock phosphate availability as influenced by soil pH. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19**, 484-487.

Fine L. O., Bartholomew R. D., 1946. The fates of rock phosphate applied to a red podzolic soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **11**, 195-197.

Ford M. C., 1932. The distribution, availability, and nature of the phosphates in certain Kentucky soils. *J. Am. Soc. Agron.*, **25**, 395-410.

Fried M., 1953. The feeding power of plants for phosphates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **17**, 357-359.

Fried M., MacKenzie A. J., 1950. Rock phosphate studies with neutron irradiated rock phosphate. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **14**, 226-231.

Gerdemann J. W., 1965. Vesicular-arbuscular mycorrhizae formed on maize and tulip tree by endogone fasciculata Mycologia. Vol. LVII, 4, 562-575.

Gericke S., 1949. Fluorine and phosphoric acid. *Z. Pflernahr. Dung.*, **46**, 152-169.

Gerretsen F. C., 1948. The influence of microorganisms on the phosphate intake by the plant. *Plant and Soil*, **1**, 51-81.

Graham E. R., 1955. Availability of natural phosphate according to energy changes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19**, 26-29.

Guernsey C. W., 1966. *Corn root distribution in soils of the Morrow Plots.* M. S. Thesis, Univ. of Illinois.

Howe D. O., Graham E. R., 1957. Salt concentration a factor in the availability of phosphorus from rock phosphate as revealed by the growth and composition of alfalfa. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **21**, 25-28.

Hsu P. S., Jackson M. Z., 1960. Inorganic phosphate transformations by chemical weathering in soils as influenced by pH. *Soil Sci.*, **90**, 16-24.

John M. K., 1962. *The distribution and transformations of soil phosphorus on differentially treated plots at the Aledo soil experiment field.* Ph. D. Thesis, Univ. of Illinois.

Jones V. S., 1948. Availability of phosphorus in rock phosphate as influenced by potassium and nitrogen salts, lime, and organic matter. *J. Am. Soc. Agron.*, **40**, 765-770.

Joos L. L., Black C. A., 1950. Availability of phosphate rock as affected by particle size and contact with bentonite and soil of different pH values. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **15**, 69-75.

Laverty J. C., 1963. *The Illinois method for determining available phosphorus in soils.* Mimeo AG 1861. Dep. Agron., Univ. of Illinois, 8 p.

Lehr J. R., Brown W. E., 1958. Calcium phosphate fertilizers. II. A petrographic study of their alteration in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **22**, 29-32.

MacKenzie A. F., 1962. Inorganic soil phosphorus fractions of some Ontario soils as studied using isotopic exchange and solubility criteria. *Can. J. Soil Sci.*, **42**, 150-156.

Manning P. B., Salomon M., 1965. Forms of phosphorus in soil after long-continued fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **29**, 421-423.

Metzger W. H., 1939. The nature, extent and distribution of fertilizer residues in the soil of some old fertility plots. *Soil Sci.*, **47**, 15-26.

Moats R., 1968. Reporting Illinois fertilizer statistics. *Illinois Fertilizer Conference Centennial Year Proc.*, 16-23.

Moschler W. W., Krebs R. D., Obenshain S. S., 1957. Availability of residual phosphorus from long-time rock phosphate and superphosphate application to Groseclose silt loam. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **21**, 293-295.

Murdoch C. L., Jackobs J. A., Gerdemann J. W., 1967. Utilization of phosphorus sources of different availability by mycorrhizal and nonmycorrhizal maize. *Plant and Soil*, vol. XXVII, 3, 329-334.

Murphy J., Riley J. P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, **27**, 31-36.

Payne H., Hanna W. J., 1965. Correlations among soil phosphorus fractions, extractable phosphorus and plant content of phosphorus. *J. Agr. and Food Chem.*, **13**, 322-263.

Peck T. R., 1962. *The evaluation of available soil phosphorus tests for Wisconsin soils.* Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin.

Perkovic M., Kovacevic-Tatic I. R., 1967. (Chemical changes in phosphorus fertilizers in parapodzol and their effect on soil properties.) *Zemlj. Biljka.*, **16**, 11-19.

Petersen G. W., Corey R. B., 1966. A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30**, 563-565.

Pratt P. F., Garber M. J., 1964. Correlations of phosphorus availability by chemical tests with inorganic phosphorus fractions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **28**, 23-26.

ROBERTSON W. K., THOMSON Jr. L. G., HUTTON C. E., 1966. Availability and fractionation of residual phosphorus in soils high in aluminum and iron. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30**, 446-450.

STAUFFER R. S., MUCKENHIRN R. R., ODELL R. T., 1940. Organic carbon, pH, and aggregation of the soil of the Morrow Plots as affected by type of cropping and manurial addition. *J. Am. Soc. Agron.*, **32**, 819-832.

STEWART R., 1920. The Illinois system of permanent soil fertility as developed by Cyril G. Hopkins. *Univ. Illinois Agr. Exp. Station.*, circular n° 245.

SUSUKI A., LAWTON R., DOLL E. C., 1963. Phosphorus uptake and soil tests as related to forms of phosphorus in some Michigan soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **27**, 401-403.

TANDON H. L. S., 1965. *Analysis of dilute-acid-fluoride extracts of soils.* M. S. Thesis, Univ. of Illinois.

TANDON H. L. S., CESCAS M. P., TYNER E. H., 1968. An acid-free vanadate-molybdate reagent for the determination of total phosphorus in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **32**, 48-51.

TANDON H. L. S., TYNER E. H., WALKER W. M., 1971. The relation of labile phosphorus to soil inorganic phosphorus forms : evaluation by regression analysis. *Proc. of the Intern. Symposium on soil fertility evaluation.* New Delhi, vol. **1**, 105-109.

TANNER C. B., JACKSON M. L., 1948. Nomographs of sedimentation times for soil particles under gravity or centrifugal acceleration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **12**, 60-65.

TARDIEUX-ROCHE A., 1966 *a*. Contribution à l'étude des interactions entre phosphates naturels et microflore du sol. Part I and II. *Ann. agron.*, **17**, 402-471.

TARDIEUX-ROCHE A., 1966 *b*. Contribution à l'étude des interactions entre phosphates naturels et microflore du sol. Part III. *Ann. agron.*, **17**, 479-528.

TRIPATHI B. R., TANDON H. L. S., TYNER E. H., 1970. Native inorganic phosphorus forms and their relation to some chemical indices of phosphate availability for soils of Agra district, India. *Soil Sci.*, **109**, 93-101.

TRUOG E., 1916. The utilization of phosphates by agricultural crops, including a new theory regarding the feeding power of plants. *Wisc. Agr. Exp. Sta. Res.*, bul. 41.

WEEKS M. E., MILLER H. F., 1948. The residual effects of phosphates used on long-time field experiments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **13**, 102-107.

WILLIAMS E. G., SAUNDERS W. M. H., 1956. Distribution of phosphorus in profiles and particle-size fractions of some Scottish soils. *J. Soil Sci.*, **7**, 90-108.

4e SÉANCE — 4th SESSION

2o COMMUNICATIONS SUR LES ESSAIS DE LONGUE DURÉE INTÉRESSANT DES MONOCULTURES

2nd PAPERS ON LONG-TERM TRIALS CONCERNING MONOCULTURE

Président de séance : Professeur A. AMBERGER

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 927-956.

EXPERIMENTS ON THE CONTINUOUS GROWTH OF ARABLE CROPS AT ROTHAMSTED AND WOBURN EXPERIMENTAL STATIONS : EFFECTS OF TREATMENTS ON CROP YIELDS AND SOIL ANALYSES AND RECENT MODIFICATIONS IN PURPOSE AND DESIGN

A. E. JOHNSTON and G. E. G. MATTINGLY

Rothamsted Experimental Station,
Harpenden, Herts. AL5 2JQ (England)

SUMMARY

This paper describes six field experiments started during 1843-77. All, with various modifications, still continue and results for various periods between 1843 and 1975 are given. Originally the experiments investigated the nutrient requirements of wheat, barley and root crops, each crop grown in monoculture. Yields on unmanured and farmyard manure treated soils were measured and compared with those given by N P K Na Mg Si supplied in inorganic compounds and tested singly and in various combinations. These experiments soon demonstrated that fertilisers could give the same yields as farmyard manure and showed the relative importance of N, P and K for the various crops.

All manures tested supplied more nutrients than were removed in the crops. Nearly all the fertiliser N residues have been lost from the soil ; some N has accumulated in soils given farmyard manure but even on these soils much has been lost. Most of the P residues have remained in the plough layer but some K has moved into the subsoil. The P and K residues can be detected by increases in the bicarbonate soluble-P and the exchangeable K but neither method of soil analysis gives an estimate of the total amount of plant available P and K in the soil. However, field experiments show that the residues are available to a wide range of crops. In some comparisons yields were always better on soils with residues than on those without, even when much new fertiliser was tested.

Soils which have received annual dressings of farmyard manure for more than 100 years now contain more organic matter than soils with fertilisers only. During recent years varieties with a high yield potential, and improved cultural techniques, including weed, pest and disease control have been introduced. In this period yields of root crops and cereals grown in rotation have been larger on farmyard manure-than on fertiliser-treated soils. This difference cannot be explained in terms of spring applied fertiliser N dressings ; further investigations are being undertaken.

INTRODUCTION

In the 1830s, when BOUSSINGAULT was making experiments in Alsace on the nutrient balance of crop rotations, Lawes was experimenting on the effects of various substances on plants grown in pots and on small plots at Rothamsted. He was impressed by the effects of 'earthy phosphates decomposed by sulphuric acid', which later led to his patent for superphosphate manufacture and the start of his manure business. These early experiments apparently convinced Lawes of two things :

1. The need to grow the same crop year after year on the same land to understand the nutrient requirements of that crop. Complementary experiments could be made on crops grown in rotation.

2. The need to make experiments on large plots. This decision has proved of supreme importance, not only because the early results were an acceptable demonstration to farmers but because it has allowed the plots to be subdivided in later years to increase their usefulness.

LAWES started the first field experiment on large plots in spring 1843 just before he appointed Gilbert as chemist in June.

This paper describes results from four of their experiments at Rothamsted. All are on arable crops grown in monoculture ; winter wheat on Broadbalk (1844), spring barley on Hoosfield (1852), root crops on Barnfield (1843), and cereals on the Exhaustion Land (1856). Two, in which LAWES and GILBERT had great interest, are at Woburn, one each on winter wheat and spring barley (1877). Much has been written about each experiment ; references are given later to detailed accounts.

THE SOIL ON WHICH THE EXPERIMENTS WERE MADE

The soils have been described by the Soil Survey of England and Wales ; those at Rothamsted (Rothamsted Experimental Station, 1974) are leached brown soils (Sols lessivés). The surface soils are mainly developed in drift overlying Clay-with-flints on Upper Chalk. All belong to the Batcombe or closely related series ; much of Broadbalk and Hoosfield are on flinty loam or deep silt loam while Barnfield and Agdell (MATTINGLY and JOHNSTON, this Conference) are on shallow flinty clay loam. The soils contain 20-28 p. 100 clay ; COOKE (this Conference) gives a typical mechanical analysis. The natural topsoils are moderately or strongly acid (pH values 4.0-5.5) but much arable land has a neutral or alkaline reaction and contains some calcium carbonate (1-3 p. 100). In former times the underlying chalk was spread on the arable fields (YOUNG, 1813 ; RUSSELL, 1916) and some soils at Rothamsted have probably been cultivated for some centuries. The soils are seldom waterlogged though drainage may be impeded to some extent by the slow permeability of the Clay-with-flints.

At Woburn two soils, both developed in drift over Lower Greensand, are reco-

gnised on Stackyard Field where experiments on cereals started in 1876. One is classified as Cottenham Series, the topsoil (0-23 cm) is a loamy sand ; the other, which has a coarser texture, belongs to the Stackyard Series, the topsoil is a sandy loam. Both soils are free draining and, at the start of the experiments, were slightly acid. At both Rothamsted and Woburn arable land is now ploughed to a depth of about 23 cm.

THE TREATMENTS TESTED

In each experiment yields without manure and with farmyard manure (FYM) were measured and compared with those given by inorganic compounds containing : nitrogen, N ; phosphorus, P ; potassium, K ; sodium, Na ; and magnesium, Mg. These inorganic fertilisers were tested alone and in various combinations.

TABLE I

Details of treatments (1), *Barnfield, Broadbalk, Hoosfield, Exhaustion Land* (2) *and Woburn* (3)

(All nutrients kg element ha^{-1})

Nitrogen : Various fertilisers to supply 48, 96, 144 and 192 kg N (N_1 N_2 N_3 N_4). Before 1967 N applied either as ammonium-N (NH_4-N), mainly ammonium sulphate, or as nitrate-N (NO_3-N), sodium nitrate. Since 1968 'Nitro-Chalk' (ammonium nitrate-calcium carbonate mixture) has been used. In this paper when ammonium- and nitrate-N are compared N* is used to denote nitrate-N. Other rates of N used are given in the text.

Phosphorus : Superphosphate to supply 32-34 kg P. Before 1889 the superphosphate was made on Rothamsted Farm from calcined bone dust and sulphuric acid. Since 1889 factory made superphosphate (almost certainly from rock phosphate) was used. During the late 1890s and until 1902, 448 kg basic slag replaced superphosphate in some years.

Potassium : Potassium sulphate to supply 90 kg K for cereals, 135 kg K for potatoes on Exhaustion Land and 225 kg K for root crops on Barnfield.

Sodium : Sodium sulphate to supply 15 kg Na on cereals and potatoes ; sodium chloride to supply 88 kg Na for root crops on Barnfield. Na was also given when sodium nitrate was used to supply N.

Magnesium : Magnesium sulphate to supply 11 kg Mg for cereals and potatoes; 22 kg Mg for root crops on Barnfield.

Farmyard manure : 35 t FYM made on Rothamsted Farm. The amount of the dressing was intended to supply 224 kg total N. Between the 1850s and 1960s the dressing probably supplied on average 220 kg N, 36 kg P, 165 kg K. From 1968 to 1975 35 t ha^{-1} has supplied 240 kg N, 43 kg P, 330 kg K. Smaller dressings were given at Woburn, 19.7 t ha^{-1} during 1877-1906 ; 14.8 t ha^{-1} during 1907-1926.

Rape cake : 1 120 kg on Hoosfield, 2 110 kg on Broadbalk, 2 240 kg on Barnfield. Rape cake, on average, contained 5.5 p. 100 N, 0.96 p. 100 P, 1.05 p. 100 K. In 1941 castor meal replaced rape cake and from 1955 the weight applied was adjusted to supply 48 or 96 kg N ha^{-1}. Not applied on Barnfield after 1959 nor on Hoosfield after 1967.

(1) Only the principal treatments are given, for details of changes and exceptions see : BARNFIELD, WARREN and JOHNSTON (1962) ; BROADBALK, JOHNSTON and GARNER (1969) ; HOOSFIELD, WARREN and JOHNSTON (1967) ; EXHAUSTION LAND, WARREN and JOHNSTON (1960) and JOHNSTON (1970); WOBURN, JOHNSTON (1975).

(2) EXHAUSTION LAND, 1856-1901 only, see text for later changes.

(3) WOBURN, 1877-1906 only, see text for later changes.

Another organic manure, rape cake, was also tested, it supplied both N and C and a little P and K.

Table 1 shows the main treatments; the fertiliser dressings were generous. N was often tested at two or more amounts and both ammonium salts (NH_4-N) and sodium nitrate (NO_3-N) were compared. Throughout this paper N* denotes the use of sodium nitrate. More K was given for root crops than for cereals.

The conventions adopted in this paper

All data are given in metric units per hectare (ha^{-1}). Most have been converted from Imperial units and rounded up where this makes no gross error. Yields of grain and straw are at 85 p. 100 dry matter, yields of root crops are fresh washed roots except sugar beet where sugar yields are sometimes given. Fertiliser applications and nutrient uptakes are given as kg element ha^{-1}.

Methods of analysis

Methods of analysis used for crops and soils are those given by MATTINGLY and JOHNSTON (this Conference).

THE ORIGINAL DESIGN OF THE EXPERIMENTS

LAWES and GILBERT gave considerable thought to the design of their experiments, as the improvements made between 1843 and 1856 show.

Although the practice was discontinued later, fields at Rothamsted were ploughed in the 1840s so that the soil was left in ridges and furrows, the ground, about 3.8 m, between the furrows was known as a 'land'. In 1843 each plot on Broadbalk and Barnfield was the length of the field and one 'land' wide. A different treatment was tested on each plot. On Broadbalk two of these 'single land' plots were combined, each continued to test a different treatment, and subsequently there has been little change in their size.

On Barnfield three 'single land' plots were made into one plot and in 1845 the P K Na Mg treatments were assigned to these strips which ran the full length of the field. Nitrogen treatments crossed all strips at right angles. In 1852 the barley experiment on Hoosfield was also designed with P K Na Mg treatments in strips crossed at right angles by N treatments; an FYM and second unmanured plot, were placed to one side of the experiment. In 1856 further modifications were made on Barnfield when FYM and FYM plus P (later PK) were introduced as main strip treatments and crossed by the N treatments. The main fertiliser treatment not tested on Barnfield was KNaMg with and without N. The importance of this was probably not appreciated in 1845 and it was not included in 1856 probably because there was no land left and no wish to change any other strip treatment.

The experiments at Woburn were set out similarly to that on Hoosfield, PK treatments in strips were crossed at right angles by N treatments with plots testing FYM at the side of the experiment. The history of the Woburn experiments is discussed later.

CHANGES IN THE EXPERIMENTS AT ROTHAMSTED

1903-1906. At Rothamsted there was little change in the arrangement of the treatments after 1856 until HALL, who was Director 1902-1912, made a few modifications in 1903-06. He added plots to Broadbalk, Barnfield and Park Grass to test NKNaMg (*i. e.* P was omitted). He also started the test of applying chalk every fourth year to half plots on Park Grass (THURSTON, WILLIAMS and JOHNSTON, this Conference).

1926. On Broadbalk, weeds, always a problem in continuous cereal growing, had been controlled by hand hoeing though occasionally parts of the field were fallowed for a whole year. Hand hoeing became increasingly expensive and in 1926 regular fallowing was introduced. Broadbalk was divided into five sections, each fallowed in turn ; after the fallow year four wheat crops were grown. Although this scheme was introduced to control weeds, it nevertheless led to the start of four important research programmes. These were :

1. The effect of fallowing and manurial treatments on the abundance of weed species (THURSTON, 1969).
2. The effect of fallow on the incidence of Wheat Bulb fly (JOHNSON, LOFTY and CROSS, 1969).
3. The effect of fallow on the yield of subsequent crops (GARNER and DYKE, 1969).
4. Studies on the incidence of soil-borne diseases particularly eyespot (*Cercosporella herpotrichoides*, FRON), first recorded in Britain on Broadbalk, and take-all (*Gaeumannomyces graminis*) (GLYNNE, 1969).

1959-1975. Recent modifications aim to make the results of the experiments more relevant to modern farming. They are intended to explain recent observations that some crops yield better when grown in rotation than in monoculture and that yields on some soils well supplied with organic matter are larger than on soils with little organic matter.

Changes in manuring introduced in 1968 and since

FYM and PK manuring have not been altered since 1974. The small annual dressing of Mg as $MgSO_4 . 7 H_2O$ (table 1) has been replaced by a dressing of $MgSO_4 . H_2O$ given every third year but supplying three times the original annual dressing. Sodium was not applied after 1973 except to the plot on Broadbalk where the amount is chemically equivalent to the K dressing. Castor meal, which replaced rape cake in 1941, is now given only to one plot on Broadbalk.

The most important changes have been in nitrogen manuring. LAWES and GILBERT originally tested both NO_3-N and NH_4-N ; at equivalent N dressings there was little difference in yield provided the timing of the dressings was correct. However, ammonium sulphate and sodium nitrate had very different effects on the soil. On some plots on Broadbalk, Hoosfield and Barnfield ammonium sulphate acidified the soil so much that by the late 1940s yields were decreased. The pH of these acid

soils was increased by applying chalk in the 1950s ; subsequently, the comparison of ammonium sulphate and sodium nitrate in these experiments ceased. N is now applied as « Nitro-Chalk ».

Changes in cropping

On Barnfield growing root crops every year ceased after 1959 ; recent modifications are discussed later.

Major changes on Broadbalk and Hoosfield were made in 1968. Much of Broadbalk and Hoosfield continues to grow only wheat and barley but the yields are now compared with those obtained by growing the cereals in rotations in which soil-borne pests and diseases are lessened. Because the modifications had to be made on existing plots it was only possible to test a three-course rotation : potatoes, beans, wheat on Broadbalk ; potatoes, beans, barley on Hoosfield. One advantage of having a rotation is that new varieties of cereals can be phased into the cropping sequences.

During 1926-67 weeds were controlled on Broadbalk by fallowing. However, in 1952 and again in 1959, continuous winter wheat was reintroduced on two small sections and a test of weed control by herbicides was started. This test was generally successful and in 1968 it was decided to use herbicides on all but one-tenth of the experiment. Fallowing was not abandoned but could only be tested on three-tenths of the experiment, so the cropping sequence is : fallow, wheat, wheat. Because of these changes there is now a good test of the effects of rotation and fallow on weeds not easily controlled by herbicides.

On Hoosfield sprays were first used to control weeds in 1944 and all crops are now sprayed when necessary. There is no test of fallowing.

BARNFIELD 1843-1975

Root crops were drilled on Barnfield every year from 1843-1959, except when barley was grown during 1853-55. Swedes, turnips, mangolds and sugar beet were all grown during various periods. Within the first two or three years LAWES and GILBERT destroyed the belief that the large leaves of turnips, swedes and sugar beet could absorb enough ammonia from the air for the plants to produce large yields. They were also convinced that phosphate was needed for these root crops so they mostly tested FYM, K, Na and Mg and forms of N. Changes in the design of the experiment before 1856 have been mentioned. WARREN and JOHNSTON (1962) gave references to detailed accounts of the early results. Here we briefly discuss yields of: 1) mangolds grown each year from 1876 to 1959 ; 2) sugar beet grown on a part, but always the same part, of each plot during 1946-59 ; 3) cereals and root crops grown during 1962-73.

1876-1959. FYM, P, K, Na and Mg treatments are in table 1 ; both NO_3-N and NH_4-N at 96 kg N ha^{-1} and rape cake at 2 240 kg ha^{-1} were tested. WATSON and RUSSELL (1943) discussed the yields of mangolds for two periods, 1876-94 and 1904-40 because there were some changes of treatment in 1904 ; potassium was

withheld from some plots and given to others for the first time. However, on plots with unchanged manuring average yields of mangolds were much the same in both periods. The only exceptions were small, but consistent decreases in yield (2.5 to 5.0 t ha^{-1}) in the second period on soils not manured with K, Na or FYM; the decreases were probably due to exhaustion of soil K. P or PK fertilisers given alone increased yield little (table 2); N gave much larger increases, especially sodium nitrate which supplied two nutrients, N and Na. All combinations of N, P and K increased yield as did FYM. Before 1930 FYM was applied in spring and yields with NPKNaMg, N*PKNaMg and FYM alone were approximately the same, 38.9, 46.0 and 42.2 t ha^{-1} (table 2). However, yields were even larger, about 60 t ha^{-1}, with FYM plus inorganic N fertiliser and NPKNaMg fertilisers plus rape cake.

TABLE 2

Yields of mangolds, roots t ha^{-1}, Barnfield, 1876-1894
(WATSON and RUSSELL, 1943)

Other treatment	No nitrogen	N applied as			
		ammonium sulphate	sodium nitrate	rape cake	rape cake plus ammonium sulphate
Unmanured	9.5	15.1	25.6	25.6	25.4
P	12.6	20.8	39.4	30.1	28.1
PK	11.3	34.4	38.9	45.2	55.5
PKNaMg ..	13.3	38.9	46.0	52.0	62.8
FYM.....	42.2	55.5	58.3	59.3	61.5

TABLE 3

Yields of mangolds, 1941-59, and sugar beet, 1946-59, roots only, t ha^{-1}, Barnfield
(WARREN and JOHNSTON, 1962)

Other treatment	No nitrogen		N applied as			
			sodium nitrate		rape cake plus ammonium sulphate	
	mangolds	sugar beet	mangolds	sugar beet	mangolds	sugar beet
Unmanured	3.8	3.8	20.3	12.6	20.3	16.1
P	5.5	4.8	29.4	16.8	23.4	18.1
PK	5.3	4.0	30.9	15.6	47.5	23.9
PKNaMg ..	6.8	4.5	36.2	20.1	48.0	25.9
FYM.....	22.3	15.6	50.2	27.9	50.0	28.6
FYM + PK	28.4	14.8	54.5	24.9	59.0	25.9

Yields of mangolds decreased considerably after the early 1940s even though fertilisers and FYM were still applied at the same rates. Whether there was a build up of some soil-borne pests or diseases or a deterioration in soil physical conditions after growing root crops continuously for 100 years is not known. Although mangold yields were much smaller in 1941-59 than in 1876-94, WARREN and JOHNSTON (1962) showed that N increased yield by the same amount, about 26 t ha^{-1}, in both periods. However, responses to P, K and Na fertilisers and to FYM were much smaller in the 1940s than in the 1880s.

Yields of sugar beet, 1946-59, and mangolds, 1941-59 are in table 3; the effects of the manurial treatments were much the same on both crops. Sodium nitrate and

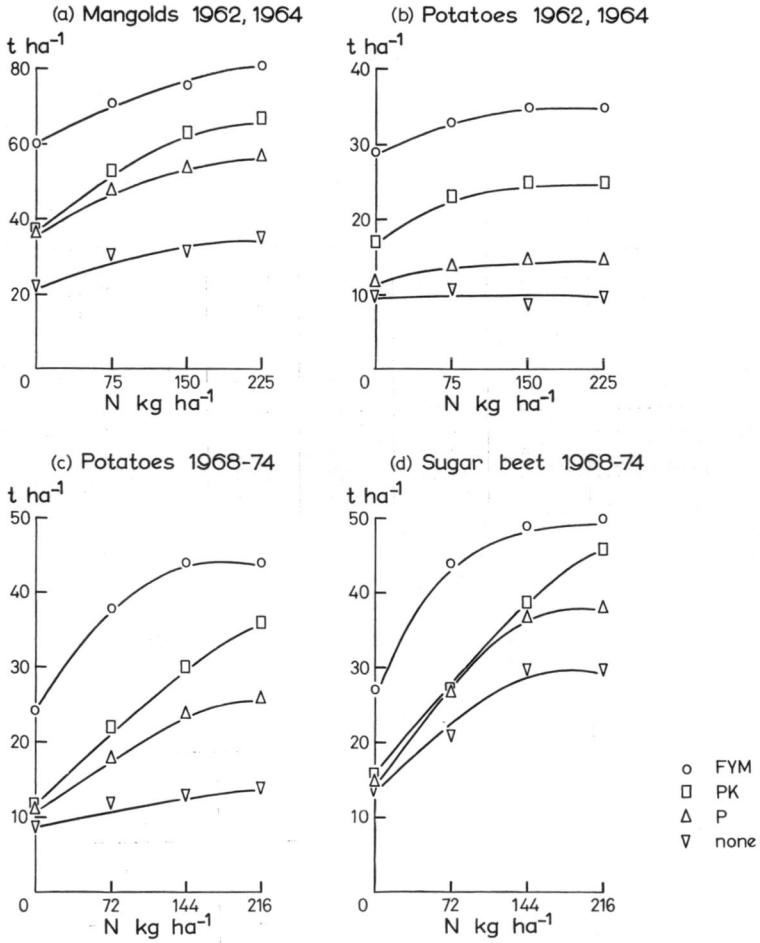


FIG. 1. — *Relationship between yields of mangolds, potatoes and sugar beet and fertiliser N applied to soils treated with farmyard manure,* ○ ; PK fertilisers, □ ; P fertilisers, △ ; or unmanured, ▽ ; during 1962-73, Barnfield.

a) Mangolds grown in 1962 and 1964
b) Potatoes grown in 1962 and 1964
c) Potatoes grown in 1969, 1971 and 1973
d) Sugar beet grown in 1969, 1971 and 1973

ammonium sulphate increased the yield of sugar beet roots by the same amount, 11.5 t ha^{-1}, when PK fertilisers were given. During 1941-59 NPKNaMg fertilisers gave larger yields than FYM, probably because the FYM was applied in autumn and ploughed in. When fertiliser N was given with FYM yields were larger than with FYM alone. Sugar beet yielded less roots than mangolds but produced more tops; consequently total dry matter yields (tops plus roots) were larger with sugar beet than with mangolds.

1962-1964. Because yields had declined so much by the 1950s it was decided to stop growing root crops continuously in 1959 and the field was fallowed in 1960-61. However the large increases in yield from adding N fertiliser to soils treated with FYM had not been explained and it was decided to test four amounts of N (0, 75, 150, 225 kg N ha^{-1} as 'Nitro-Chalk') on potatoes and mangolds grown on all plots. Yields in 1962 and 1964 are summarised in figure 1. Mangolds (fig. 1 *a*) yielded as much in 1962-64 as in 1876-94 (table 2). Yields were always larger on FYM- than on PK-treated soils at all amounts of N tested. Potatoes (fig. 1 *b*), a crop not previously grown on Barnfield, also yielded well and, like mangolds, yields were larger on FYM-treated soils. For both potatoes and mangolds the shape of the response curves to N suggested that yields on PK-treated soils would not have equalled those on FYM-treated soils no matter how much N was applied. Responses to N on soils without PK or with P only, figures 1 *a* and 1 *b*, show that potatoes were much more susceptible to shortage of P or K than were mangolds.

1968-1973. During this period potatoes, barley, sugar beet and spring wheat were grown in rotation starting with the two cereal crops on half plots in 1968. Four amounts of N were again tested : 0, 72, 144, 216 kg N ha^{-1} for root crops; 0, 48, 96, 144 kg N ha^{-1} for cereals. Potatoes in 1968-73 (fig. 1 *c*) yielded more than in 1962-64 (fig. 1 *b*), best yields were about 10 t ha^{-1} larger in 1968-73. Sugar beet (fig. 1 *d*) also yielded well during 1968-74, best yields were nearly twice those in 1946-59 (table 3). Both sugar beet and potatoes yielded more on FYM than on

TABLE 4

Yields of barley and spring wheat, Barnfield, 1968-73 (1)
(grain, t ha^{-1}, at 85 p. 100 dry matter)

Treatment	N dressing, kg N ha^{-1}							
	Barley				Spring wheat			
	0	48	96	144	0	48	96	144
FYM	4.18	5.40	5.16	5.08	2.44	3.73	3.92	3.79
PK	1.85	3.74	4.83	4.92	1.46	2.97	3.53	4.12
P	1.82	4.22	4.96	4.95	1.57	3.22	3.77	4.20
Unmanured	2.10	3.75	4.96	4.67	1.70	3.07	3.44	4.09

(1) Cereals were grown in 1968, 1970 and 1972.

PK-treated soil, but the effect was smaller with sugar beet (4 t ha^{-1}) than with potatoes (7.8 t ha^{-1}) when 216 kg N ha^{-1} was given. Sugar beet, like mangolds in 1962-64, responded more to N on soils without PK or without K than did potatoes.

With optimum fertiliser N barley yielded a little more and spring wheat slightly less when grown on FYM-treated soil than on PK-treated soil (table 4). Yields of both barley and spring wheat were not increased by giving potassium (table 4), agreeing with other results on the heavier soils at Rothamsted. This suggests that the amount of K released each year by weathering is still sufficient to supply the needs of a spring cereal yielding up to 5 t grain ha^{-1}. An apparently unexpected result in table 4 is that cereals yielded so well on soil without PK ; these soils, however, contain much more bicarbonate soluble-P (table 16) than similarly unmanured soils at Rothamsted. This is partly because LAWES and GILBERT applied some P to these soils during 1843-52 and partly because the tops of the root crops were left on the plots to be ploughed in so returning nutrients to the soil.

1967-1975. Field beans (tic) were grown on all plots in 1967. Yields on FYM- and PK-treated soils were 4.52 and 1.58 t grain ha^{-1} respectively. Subsequently beans have been grown on the same fifth of the field each year and experiments made during these years have shown that the large difference in yield in 1967 was due to an interaction between soil organic matter and the selective herbicide (simazine) used to control weeds. Simazine applied at the recommended rate per hectare did not damage beans on FYM-treated soil, because it contained enough organic matter to retain the simazine near the surface and prevent it washing down through the soil.

BROADBALK 1844-1975

Winter wheat has been sown on all or part of Broadbalk every year since autumn 1843. The experiment has always attracted much attention because it demonstrated that wheat, a staple food for many people, could, if given sufficient nutrients, be grown on the same land year after year. LAWES and GILBERT described the results on many occasions, the last (LAWES and GILBERT, 1895) summarised the first 50 years; subsequently, RUSSELL and WATSON (1940) considered the results up to the late 1930s. In 1968 the first volume of Part 2 of the Rothamsted Report contained nine papers, each summarising one aspect of the studies made on Broadbalk.

Initially the main plots were as long as the field (about 350 m) and each had a different treatment. The treatments (table 1) were not randomised ; the first six plots then received in order : FYM, nothing, PKNaMg, N_1PKNaMg, N_2PKNaMg and N_3PKNaMg, and the effects of the manures on growth were (and still are) visually very striking. Originally 172 kg N ha^{-1} was also tested but was abandoned because the varieties of wheat then grown always lodged badly when given this much N. Table 5 shows yields for two decades, 1852-61 and 1902-11, and for 1970-75. Where wheat has been grown for more than 120 years yields have not diminished ; in 1970-75 they were more than doubled compared to any other period because a better variety (*Cappelle Desprez*) was grown and cultivations and weed and pest control have improved.

TABLE 5

Effect of fertilisers and FYM on yields of winter wheat grown continuously, Broadbalk
(grain, t ha^{-1}, at 85 p. 100 dry matter)

Treatment	Period and Variety		
	1852-61 *Red Rostock*	1902-11 *Squarehead's Master*	1970-75 *Cappelle Desprez*
Unmanured	1.12	0.80	1.70
FYM	2.41	2.62	5.80
PKNaMg	1.29	1.00	2.09
N_1PKNaMg	1.91	1.58	3.99
N_2PKNaMg	2.42	2.28	5.23
N_3PKNaMg	2.52	2.76	5.47
N_4PKNaMg	—	—	5.48

Yields in 1844 showed that N was more important than PKNaMg for wheat at Rothamsted ; this was still true in 1970-75, yields on unmanured soil and those given PKNaMg, N_2 and N_2PKNaMg were 1.70, 2.09, 2.83 and 5.23 t ha^{-1} respectively. Table 5 shows how N increased yields of wheat grown continuously ; 48 and 96 kg N ha^{-1} gave large increases, 144 kg N ha^{-1} always gave maximum yield, but 172 kg N ha^{-1} did not increase yield further in 1970-75 (or in 1852-64 when N_4 was still tested). Both FYM and optimum fertilisers gave much the same yield in the earlier periods but during 1970-75 yields were about 0.3 t ha^{-1} more on FYM-treated soils.

LAWES and GILBERT tested both forms and times of application of N fertilisers. The results led them to apply all NO_3-N in spring but NH_4-N was applied part in autumn (24 kg N ha^{-1} irrespective of total dressing) and the remainder in spring. Used in this way NO_3-N increased grain yield by about 10 p. 100 before fallowing was started in 1926.

Another important result quickly learnt and long demonstrated was that for wheat there was no residual effect of the 96 kg N ha^{-1} dressing. This test was made by alternating the treatments on two plots so that each year wheat was grown with fresh N and residual PKNaMg and with residual N and fresh PKNaMg. During 1852-1967 fresh N gave 2.11 t ha^{-1}, residual N 1.03 t ha^{-1} ; for comparison soils receiving N_2PKNaMg and PKNaMg each year gave yields of 2.22 and 1.13 t ha^{-1} respectively.

There were also tests of P and K when 96 kg N ha^{-1} (N_2) was given. During 1852-1967 yields with N_2, N_2P and N_2PK were 1.58, 1.67 and 2.12 t ha^{-1} respectively. P had a very small effect, K, in the presence of P, a much larger one, 0.45 t ha^{-1}. These effects of P and K on wheat are quite different from those on barley on Hoosfield ; on barley P had a large effect, K a small one.

In a test unique to Broadbalk Na and Mg were applied separately at rates chemically equivalent to the amount of K applied. Yields with N_2PNa and N_2PMg

were 2.03 and 2.02 t ha^{-1} respectively, only slightly less than the yield given by N_2PK (2.12 t ha^{-1}). This effect of Na and Mg is interesting ; the crops grown on these two soils both contained appreciably more K than that on N_2P-treated soil. Possibly the Na and Mg released extra soil K which benefited the wheat. Since 1968 this test is continued only on the N_2PNa plot.

1968-1975. Changes introduced in 1968 have already been described. Yields of wheat grown continuously can now be compared with those of wheat grown after fallow and in the rotation, potatoes, beans, wheat (table 6). Yields were affected

TABLE 6

Effect of treatment, fallowing and crop rotation on winter wheat yields, Broadbalk 1970-75

(grain, t ha^{-1}, at 85 p. 100 dry matter)

Treatment	Wheat grown			
	Continuously	1st crop after fallow	In rotation after beans	2nd crop after fallow
Unmanured	1.70	3.13	2.67	1.40
FYM.....	5.80	6.48	6.76	5.88
PKNaMg	2.09	3.76	3.16	1.58
$N_1PKNaMg$	3.99	4.88	5.36	3.76
$N_2PKNaMg$	5.23	5.16	6.19	5.35
$N_3PKNaMg$	5.47	4.98	5.78	5.85
$N_4PKNaMg$	5.48	4.97	5.60	5.92

by the interaction of at least three factors, nitrogen supply, soil-borne disease and lodging. The one-year fallow lessened the inoculum of soil-borne fungi (especially the take-all fungus, *Gaeumannomyces graminis*) and increased the amount of crop-available soil N. For the first crop after fallow the optimum N dressing was not the largest amount tested, and where large dressings were given yields decreased because of lodging. The second crop after fallow got no benefit from extra N in the soil and maximum yield was given by the largest amount of N tested. The two-year break of potatoes and beans left very little take-all and 96 kg N ha^{-1} gave the best yield with fertilisers ; where more N was given yield was lost due to lodging. Table 6 also shows that during 1970-75 wheat following beans or fallow yielded more on soils for long treated with FYM than on fertiliser-treated soils. The reason for this is being investigated ; the response by these crops to spring applied fertiliser N suggests that giving more N in spring would not eliminate the difference. Giving extra fertiliser N (96 kg N ha^{-1} in spring as 'Nitro-Chalk') to soils treated with FYM increased straw but not grain yields. Grain yields were often less because the crop lodged.

Potatoes have been grown on Broadbalk since 1968 and, in contrast to wheat, potato yields were increased by giving 96 kg N ha^{-1} with the FYM. During 1970-75 yields with FYM alone and with $N_3PKNaMg$ were almost identical, 39.7 and 39.4 t ha^{-1} ; $N_4PKNaMg$ gave 41.4 t ha^{-1} and FYM + N_2 45.4 t ha^{-1}.

HOOSFIELD BARLEY 1852-1975

1852-1967. Spring barley has been grown on 1.8 ha of Hoosfield every year since 1852. The only exceptions were 1912, 1933, 1943 and 1967 when the whole field was fallowed ; weed control by mechanical cultivations was much easier in spring sown barley than in autumn sown wheat. LAWES and GILBERT (1895) described results for the first 30 years. RUSSELL and WATSON (1938) discussed yields, crop composition and grain quality. WARREN and JOHNSTON (1967) summarised results, including crop and soil analyses, to 1966 and listed other published work.

The original design of the experiment has been mentioned ; treatments are in table 1. Originally two amounts of N, 48 and 96 kg N ha^{-1}, were tested but the larger amount invariably lodged the crop and decreased yield so the test was abandoned in 1857. Between 1868 and 1967 48 kg N ha^{-1} was given as ammonium sulphate, sodium nitrate or rape cake. Since 1968, N as 'Nitro-Chalk' was tested at 48, 96 and 144 kg N ha^{-1}.

Yields during three decades, 1852-61, 1902-11, 1952-61 and in 1970-75 (table 7) varied little on unmanured soil, especially after readily mineralised soil organic N was exhausted. FYM doubled yield during the first ten years and then as the soil became richer in FYM residues, yields were increased fourfold by the combined effect of fresh dressings and residues. PKNaMg fertilisers alone gave small increases in yield. All three N fertilisers given with PKNaMg increased yield by between 1.0 and 1.5 t ha^{-1} during the first three decades. No one form of N was obviously best suggesting that organic N in rape cake was rapidly mineralised. In the first

TABLE 7

Effect of fertilisers and FYM on the yield of barley, Hoosfield, 1852-1975
(grain, t ha^{-1}, at 85 p. 100 dry matter)

Treatment (1)	Period and Variety			
	1852-61 Chevalier	1902-11 Archers Stiff Strawed	1952-61 Plumage Archer	1970-75 Julia
Unmanured	1.43	0.65	0.93	1.19
FYM	2.85	2.96	3.51	5.02
PKNaMg	1.92	1.05	1.37	1.34
NPKNaMg	2.91	2.52	2.37	3.64
N*PKNaMg ...	(*a*)	2.48	2.50	3.97
CPKNaMg	2.99	2.50	2.51	4.13

(1) 48 kg N ha^{-1} applied as :
N, ammonium sulphate ; N*, sodium nitrate, (started 1868) ; C, rape cake. All nitrogen given as 'Nitro-Chalk' since 1968.

period yields were larger with fertilisers than with FYM ; later FYM gave larger yields as FYM residues accumulated in soil.

Best yields in 1970-75 were nearly 1.5 t ha^{-1} more than in 1952-61 on soils adequately manured. Change in variety, better cultivations, chemical control of weeds and foliar diseases were all responsible for the extra yield.

The effects of P, KNaMg, and PKNaMg fertilisers were tested in the presence and absence of N. During the first 110 years 48 kg N ha^{-1} gave an average annual yield of 1.49 t grain ha^{-1}. Given this amount of N, KNaMg increased yield by only 0.15 t ha^{-1} but P gave an extra 0.88 t ha^{-1} while PKNaMg yielded 0.98 t ha^{-1} more. These results showed the importance of adequate P manuring for barley and the small response to K on Rothamsted soil. Recent results, when yields have been larger, confirm these conclusions.

1968-1975. Reasons for the modifications made in 1968 have been given. Yields of barley grown continuously are compared with those after a two year break of potatoes and beans. On soils well supplied with P and K, barley yielded well during 1970-75 ; 96 kg N ha^{-1} gave 5.16 t grain ha^{-1} ; an extra 48 kg N ha^{-1} only increased yield by a further 0.2 t ha^{-1} (table 8). Barley given a fresh dressing of FYM (35 t ha^{-1}), on soil long treated with FYM, yielded 5.02 t grain ha^{-1} and adding 48 kg N ha^{-1} as fertiliser N increased yield by an extra 0.53 t ha^{-1}. Larger dressings of fertiliser N on FYM-treated soils decreased yields. During 1970-75 FYM was ploughed in in autumn and any nitrate in the manure or produced by mineralisation during late autumn could be leached during winter. This may explain why 48 kg ha^{-1} fertiliser N gave a worthwhile increase in yield. On soils without P or K since 1852, N increased yield little, 144 kg N ha^{-1} gave only 2.53 t grain ha^{-1}.

TABLE 8

Effect of nitrogen on the yield of barley, Hoosfield, 1970-75
(grain, t ha^{-1}, at 85 p. 100 dry matter)

Treatment	N dressing, kg N ha^{-1}			
	0	48	96	144
Unmanured	1.30	2.06	2.34	2.53
PKNaMg	1.69	3.64	5.16	5.36
FYM.....	5.02	5.55	5.39	5.24

Barley grown continuously and in rotation can only be compared on PK-treated soils. Barley grown in rotation yielded more than barley grown continuously at each amount of N tested, but with 96 or 144 kg N ha^{-1} differences in yield were small (table 9). Yields of barley grown continuously, given in tables 8 and 9, are not identical because the comparison between continuous and rotation barley was made on soils treated with castor meal from 1852 to 1966. With the smaller amounts of N yields were larger on soils with castor meal residues than on those without. However,

Julia barley grown continuously and given sufficient N yielded almost the same on soils with and without castor meal residues.

When no N was given, barley after beans in the three-course rotation yielded 1.6 t ha^{-1} more than barley grown continuously (table 9). The N residues from beans cannot, however, be valued in terms of a fresh N dressing because barley after beans was probably less affected by any soil-borne pathogens than barley grown continuously.

TABLE 9

Effect of N on yields of barley grown continuously and in rotation (1), *Hoosfield, 1970-75*

(grain, t ha^{-1}, at 85 p. 100 dry matter)

Barley grown	N dressing, kg N/ha^{-1}			
	0	48	96	144
Continuously	2.39	4.13	5.45	5.45
In rotation	4.00	5.23	5.68	5.76

(1) For PK dressings see table 1.

THE EXHAUSTION LAND 1852-1974

1852-1901. JOHNSTON (1970) summarised the results from many short period tests made by LAWES and GILBERT which valued residues of fertiliser and FYM dressings. However, the most outstanding experiment on the value of P and K residues started in 1902 on the Exhaustion Land and still continues. Experiments made on the site from 1852 to 1901 were described by WARREN and JOHNSTON (1960). Between 1856 and 1874 various combinations of N, P and K fertilisers were tested on winter wheat. In 1876 extra fertiliser treatments were included and a test of FYM introduced. Potatoes were grown each year from 1876 to 1901. Estimates of total amounts of P and K applied in fertilisers and FYM between 1856 and 1901 are in table 10. The residual values of these nutrients have been tested since 1902.

1902-1940. No fertilisers were applied and cereals were grown except on plots 5 to 10 which grew legumes during 1905-11. Cereal yields were increased in the first year or two where inorganic N was given before 1902 ; there were larger effects, which persisted longer, from residues of FYM. Subsequently yields were recorded only between 1917-22 and during this period neither fertiliser nor FYM residues increased yields ; presumably too little N was mineralised from any extra organic matter in the soil.

1941-1974. Barley, given N only, was grown each year, N dressings were 63 kg ha^{-1} during 1941-62 and 88 kg ha^{-1} during 1963-74. Soil analyses in 1951 and

1974 are in table 10 as are yields of three varieties of barley grown between 1949-74. In 1949-62 yields of Plumage Archer were almost doubled by the combined effect of P and K residues from either fertilisers or FYM which had, by then, been in the

TABLE 10

Yields of barley during 1949-74, P and K in soil and estimated total amounts of P and K given during 1856-1901, Exhaustion Land

		Treatment		
		No P No K (1)	Residues of PK fertilisers 1856-1901 (2)	Residues of FYM 1876-1901 (3)
P and K applied 1856-1901				
P kg ha^{-1}		0	1 410	1 260
K kg ha^{-1}		0	5 070	3 920
Soil analysis 0-23 cm depth				
Total P	1951	570	748	761
mg kg^{-1}	1974	535	657	675
$NaHCO_3$-soluble P	1951	7	23	27
mg kg^{-1}	1974	2	8	12
Exchangeable K	1951	74	131	106
mg kg^{-1}	1974	69	96	87
Barley grain, t ha^{-1}, at 85 p. 100 dry matter				
1949-62	*Plumage Archer* (4)	1.76	2.90	3.13
1964-69	*Maris Badger* (5)	1.73	3.62	4.29
1970-74	*Julia* (6)	1.83	4.32	4.75

(1) Average of 4 plots, one of which was given very small dressings of P and K in 1876-81.
(2) Average of 3 plots.
(3) Average of 2 plots.
(4) Average of 10 crops each given 63 kg N ha^{-1}.
(5) Average of 6 crops each given 88 kg N ha^{-1}.
(6) Average of 5 crops each given 88 kg N ha^{-1}.

soil for between 50 and 100 years. Since then yields have been much the same each year on soils without residues. Newer varieties, *Maris Badger* and *Julia*, have yielded *more* than *Plumage Archer* on soils with residues (table 10). Soils with PK residues now yield about as much grain per hectare as the average of all barley crops grown in England and Wales. Results for one plot (9) are excluded from the averages given in table 10 because less K was applied during 1856-1901 than on other fertiliser plots. However, yields on plot 9 during 1970-74 were only about 0.5 t grain ha^{-1} less than on PK residue plots, suggesting that the residues acted mainly through the P they supplied.

1957-1958. To test whether the PK residues would increase yields of crops other than barley six crops were grown each year in 1957 and 1958. P and K were tested separately, dressings of NK were given where P was tested and NP where K was tested. In addition, the effects of new dressings of P and K were also measured. Table 11 summarises the yields, they were discussed in detail by JOHNSTON, WARREN and PENNY (1970).

TABLE 11

Effect of P and K residues and dressings of new P and K on six crops, Exhaustion Land, 1957-58 (1)

Crop	Experiments testing P				Experiments testing K			
	P given kg ha^{-1}	Yield on soil		Effect of P residues	K given kg ha^{-1}	Yield on soil		Effect of K residues
		without residues	with residues			without residues	with residues	
Barley grain t ha^{-1}	0	2.03	3.11	1.08	0	3.34	3.54	0.20
	56	3.49	3.48	— 0.01	63	3.56	3.56	0
	response	1.46	0.37		response	0.22	0.02	
Spring wheat grain t ha^{-1}	0	2.38	2.81	0.43	0	3.31	2.99	— 0.32
	56	3.29	3.01	— 0.28	63	3.23	2.99	— 0.24
	response	0.91	0.20		response	— 0.08	0	
Potatoes tubers t ha^{-1}	0	12.8	21.1	8.3	0	17.1	27.6	10.5
	56	32.6	32.6	0	126	31.1	36.7	5.6
	response	19.8	11.5		response	14.0	9.1	
Sugar beet sugar t ha^{-1}	0	3.84	5.67	1.83	0	4.87	6.15	1.28
	56	5.72	6.00	0.28	126	5.67	5.43	— 0.24
	response	1.88	0.33		response	0.80	— 0.72	
Swedes roots t ha^{-1}	0	21.3	38.9	17.6	0	37.7	46.7	9.0
	56	44.7	44.9	0.2	63	40.2	47.7	7.5
	response	23.4	6.0		response	2.5	1.0	
Kale t ha^{-1}	0	37.2	48.2	11.0	0	50.7	53.0	2.3
	56	50.5	53.7	3.2	126	45.7	57.2	11.5
	response	13.3	5.5		response	4.2	4.2	

(1) From JOHNSTON, WARREN and PENNY (1970).

Where P was tested all six crops yielded more on soils with P residues than on soils without ; 56 kg P ha^{-1} as a fresh dressing increased yields of all crops and yields were much the same on soils with and without residues. This result contrasts with that given by MATTINGLY and JOHNSTON (this Conference, table 3) for the Agdell experiment. A single dressing of new P to starved and enriched soils did not give the same yield on both ; soils with residues always yielded more. Why crops responded differently on the Exhaustion Land is not known. The soil is comparatively

easy to cultivate and may possess some physical property that allows roots to grow readily. Freshly applied nutrients may therefore be more accessible on this soil than on a more 'difficult' soil like that on Agdell. A similar explanation could also account for the large benefit in recent years of the old PK residues.

There were large increases in potato yields due to K residues in soil and to freshly applied K, but cereal yields were increased hardly at all. However, barley yields were not large during 1957-58 and newer varieties now grown might give small responses to K. Yields of swedes, sugar beet and kale were all larger on soils with K residues than on soils without, responses to fresh K were more variable.

EXPERIMENTS ON WHEAT AND BARLEY GROWN EACH YEAR AT WOBURN

In 1876 the Duke of Bedford made available a farm at Woburn in Bedfordshire for agricultural experiments ; initially there were two, one tested the residual value of animal feedingstuffs (MATTINGLY and JOHNSTON, this Conference), the other the effects of fertilisers and FYM on wheat and barley grown each year. They were supervised by the Royal Agricultural Society of England. The results were discussed in detail by RUSSELL and VOELCKER (1936) and were summarised by JOHNSTON (1975) The Woburn Experimental Station has been supervised from Rothamsted since 1921.

1877-1926. During 1877-1906 the amounts of fertilisers tested were the same as on cereals at Rothamsted ; except that the larger amounts of N were not tested on wheat and FYM dressings were less. Thus the effects of fertilisers on cereals grown on clay loam soils at Rothamsted and on sandy loam at Woburn could be compared. During 1877-86 yields of both wheat and barley were much the same as they had

TABLE 12

Yields of wheat and barley grown in the Continuous Wheat and Barley experiments, Woburn (1)

(grain, t ha^{-1}, at 85 p. 100 dry matter)

Treatment	Wheat		Barley	
	1877-86	1917-26	1877-86	1917-26
Unmanured	1.08	0.46	1.56	0.49
PKNaMg	1.13	0.56	1.35	0.59
N.....	1.63	0.04	2.30	0.09
N*.....	1.50	1.02	2.35	0.67
NPK.....	2.04	0.64	2.57	0.30
N*PK.....	2.12	1.08	2.73	0.97
FYM.....	1.76	1.20	2.39	1.54

(1) From JOHNSTON, 1975.

been in the first decade of the comparable experiments on Broadbalk and Hoosfield. The effects of the manures were much the same too ; PK fertilisers alone had little effect but N increased yield considerably. NPK fertilisers gave the largest yield, larger than FYM, probably because the small dressing, 20 t ha^{-1}, supplied too little N. As at Rothamsted the residual effect of fertiliser N dressings, applied in alternate years, was small.

The fertiliser dressings were considerably decreased after the first 30 years ; this decision was probably taken because yields in the early 1900s were poor and the amounts tested in earlier years probably appeared excessive relative to those used by farmers on light soil. From 1907 N dressings were halved, P was decreased to about two-thirds and K to a quarter of the original dressings. The FYM dressing was also decreased and Na and Mg no longer applied. Yields of wheat and barley during 1877-86 and 1917-26 in table 12 show how large was the decline, though it was less on FYM-treated soil than on soils given fertilisers. However, it is impossible to tell how much yields were affected by the decreased fertiliser dressings and how much they diminished because of increasing soil acidity.

We now understand more clearly why yields declined at Woburn in the 1890s but, at that time, little was known about the concept of acidity or how to measure it. JOHNSTON and CHATER (1975) recently re-analysed soil samples taken during 1876-1959 and showed how acidity gradually increased in all soils, especially quickly where ammonium sulphate was given. Increasing acidity and competition from weeds tolerant of the acid conditions decreased cereal yields considerably. Field tests of liming started in 1898. Chalk, 10 t ha^{-1}, applied to the most acid soils increased yields of wheat from 0.36 to 1.25 t grain ha^{-1} and of barley from 0.22 to 1.3 t grain ha^{-1} during 1907-16. Studies on soil acidity continued and VOELCKER (1923) concluded that the research at Woburn was the first to yield results on the effects of soil acidity and the use of lime to remedy this.

1927-1955. No P, K or FYM were applied after 1926 except for a few very small dressings on some plots (JOHNSTON, 1975). However winter wheat and spring barley were still grown during 1927-55 to measure the effects of fallowing and test different amounts of N as 'Nitro-Chalk'. During 1943-55 soils previously given ammonium sulphate were so acid that crops were not sown and on other plots crops failed in some years. The best crops grown in this period were, however, only a little larger than those in 1877-86.

1955-1974. In 1953 it was decided to lime all soils to about pH 6 (in water) their soil reaction in 1876. The first chalk dressings were applied in 1955. JOHNSTON and CHATER (1975) described changes in soil pH, amounts of chalk applied and losses of chalk from the surface soils between 1954 and 1959. By 1959 the pH of all surface soils ranged from 5.7 to 5.9.

Yields during 1943-54 showed some residual effects from PK applied either as fertilisers or FYM during 1877-1926. So, on part of the experiments, between 1960 and 1962 the value of the residues were tested for potatoes, sugar beet and barley as they had been at Rothamsted on the Exhaustion Land and Agdell ; JOHNSTON, WARREN and PENNY (1970) discussed the results in detail, they were more like those on Agdell than on the Exhaustion Land. Crops were always larger on soils with residues than on those without, even when new dressings of P and K were given.

Wheat and barley, both given 112 kg N ha^{-1}, were grown on the remaining plots during 1959-62, yields were about double the best in 1943-54. Liming had been beneficial.

1966-1974. Although cereal yields had been increased by liming, a new experiment was started in 1966 on a third of each site to attempt to increase yields still further. Wheat was still grown on the wheat site, barley followed barley. Cereals grown continuously were compared with those in a five-course rotation : one-year grass ley followed by potatoes and three cereal crops. Generous dressings of P (57 kg P ha^{-1}) and K (215 kg K ha^{-1}) were given each year, magnesian limestone was applied regularly to prevent serious acidity developing and four amounts of N were tested. Yields of both cereals were much better than any grown previously (table 13).

TABLE 13

Effect of nitrogen on yields of wheat and barley grown both continuously and in rotation, 1969-74, Woburn

(grain, t ha^{-1}, at 85 p. 100 dry matter)

Wheat

	N dressing kg N ha^{-1}			
	63	126	189	252
1st wheat after potatoes	3.44	4.50	4.52	4.28
2nd wheat after potatoes	2.51	3.50	3.42	3.28
3rd wheat after potatoes	1.92	2.92	3.07	3.11
Wheat grown each year	2.40	3.11	3.40	2.95

Barley

	N dressing kg N ha^{-1}			
	50	100	150	200
1st barley after potatoes.....	3.98	4.93	5.09	4.82
2nd barley after potatoes ...	3.44	4.82	4.91	4.90
3rd barley after potatoes	3.32	4.63	4.71	4.66
Barley grown each year	2.74	4.06	4.58	4.69

Best yields were given by crops immediately following potatoes but the optimum N dressing was not always the largest amount tested. When barley yields in the different crop sequences were compared, barley grown continuously yielded least except when most N was given. The best yield of continuous wheat was larger than that of the third wheat after the break. Both N and crop sequence affected yield ; the differences may be explained when data for the incidence of soil-borne pathogens on these crops are summarised.

PLANT NUTRIENTS IN CROPS

Amounts of N P K Na Ca Mg at harvest in well-manured crops grown in the 1950s-1960s are in table 14 ; detailed results are elsewhere : Broadbalk (JOHNSTON, 1969 *a*), Hoosfield (WARREN and JOHNSTON, 1967) and Barnfield (WARREN and JOHNSTON, 1962). The amounts are those in grain plus straw and in tops plus roots.

TABLE 14

Amounts of N, P, K, Na, Ca, Mg in crops at harvest on Broadbalk, Hoosfield and Barnfield

Experiment and year	Crop	Treatment	kg element ha^{-1} (1)					
			N	P	K	Na	Ca	Mg
Broadbalk 1966-67 (2)	Continuous wheat	FYM	63	13	38	0.7	7	4.9
		$N_3PKNaMg$	76	15	39	0.7	10	5.7
	1st wheat after fallow	FYM	121	21	80	1.0	16	9.1
		$N_3PKNaMg$	90	15	44	1.0	14	7.1
Hoosfield 1964 and 1966 (3)	Continuous barley	FYM	79	21	66	1.9	11	6.7
		$N_2PKNaMg$	83	20	55	1.7	11	7.0
Barnfield 1958-59 (4)	Mangolds	FYM	54	13	137	27	18	6.6
		$N_2PKNaMg$	85	16	194	43	17	8.5
	Sugar beet	FYM	69	12	109	21	26	11.2
		$N_2PKNaMg$	85	12	128	24	23	10.1

(1) In grain plus straw of cereals and tops plus roots of root crops.
(2) From JOHNSTON, 1969 *a*, variety *Squareheads' Master*.
(3) From WARREN and JOHNSTON, 1967, variety *Maris Badger*.
(4) From WARREN and JOHNSTON, 1962.

Grain and straw were always removed from the plots but tops of root crops on Barnfield were left to be ploughed in. Cereals, except those grown continuously, contained more N, P and K on FYM- than on PK-treated soils. Root crops on Barnfield removed more N and K from PK- than from FYM-treated soil. All crops removed much the same amount of Mg ; there was a little more Ca in the root crops. Cereals contained little Na, there was much more in the root crops grown on Barnfield, 88 kg Na ha^{-1} was given with the fertiliser dressings but no extra Na was given with FYM.

The percentage recovery of added nutrients is calculated as :

$$\frac{\text{amount in treated crop } \textit{minus} \text{ amount in untreated crop}}{\text{amount applied}} \times 100$$

this is often used as a measure of fertiliser efficiency. Percentage recoveries of P and K are usually small, less than 20 p. 100, because these nutrients are not very mobile in soil and soil reserves supply much of the plant's requirements. For elements not readily lost from soil by leaching it is often more important to consider amounts removed in relation to amounts applied. If the amount applied exceeds that removed then measurable residues accumulate in soil. Results given earlier, especially for the Exhaustion Land, show that these residues can be used by crops. If removals exceed supply the excess must be at the expense of soil reserves and this may diminish yield of following crops.

At present little is known about the fate of N not taken up by the crop for which it was given. Little of the residual N remains in soil for long. JOHNSTON (1976) calculated that after 130 years of manuring on Broadbalk extra soil N accounted for less than 5 p. 100 of residual fertiliser N and less than 15 p. 100 of residual FYM-N. He also showed that recovery of added N in these experiments at Rothamsted was often very much larger than in other long-term experiments. This was because crops grown on soil given no N for so long removed only small amounts, wheat, barley, potatoes, sugar beet and grass have all removed between 30 and 35 kg N ha^{-1} each year since the mid-1960s.

PLANT NUTRIENTS IN SOILS

Plant nutrients in the soils have been progressively impoverished or enriched depending on manuring and cropping. Detailed soil analyses have been given for Broadbalk (JOHNSTON, 1969 *b*), Barnfield (WARREN and JOHNSTON, 1962), Hoosfield (WARREN and JOHNSTON, 1967), Woburn (JOHNSTON and CHATER, 1975 and MATTINGLY, CHATER and JOHNSTON, 1975) and the Exhaustion Land (JOHNSTON and POULTON, 1977).

Nitrogen. Broadbalk and Hoosfield soils were sampled by LAWES and GILBERT and samples have been taken since. Figure 2 *a* and *b* show changes in soil N with time for Broadbalk and Hoosfield respectively. After the first few years N percentage in the unmanured soils changed little and adding PK fertiliser had little effect. On Broadbalk soil, N increased by 0.015 percentage N during the first 20 years where N_2PKNaMg fertiliser was given, p. 100 N then remained remarkably constant. Five plots on Broadbalk have comparable manuring and yield similarly, all five soils contained 0.114 $\pm$ 0.001 p. 100 N in 1966. The increase in N content is thought to come from the N in the larger plant residues returned each year to the soil rather than from inorganic N accumulations. Similar small increases occurred on Hoosfield. Soil N increased much more where annual dressings of 35 t ha^{-1} FYM were applied. FYM-treated soil contained 0.25 p. 100 and 0.29 p. 100 N on Broadbalk and Hoosfield respectively in the 1960s.

Much of the variability in percentage N in unmanured and fertiliser treated soil reflects changes in methods of sampling and analysis (JOHNSTON, 1969 *b*). However, on Broadbalk some of the decline in percentage N of FYM-treated soil between 1914 and 1936 must be due to extra fallowing for weed control during 1926-29. Once the fallowing cycle (one year in five) was established in 1931 soil N increased

again. More N accumulated in soils where continuous wheat was reintroduced in 1952 than in soils which continued to be fallowed (JOHNSTON, 1969 *b*).

The effects on soil N of fertiliser and FYM treatments lasting more than 100 years are summarised in table 15 for the Broadbalk, Hoosfield and Barnfield experiments.

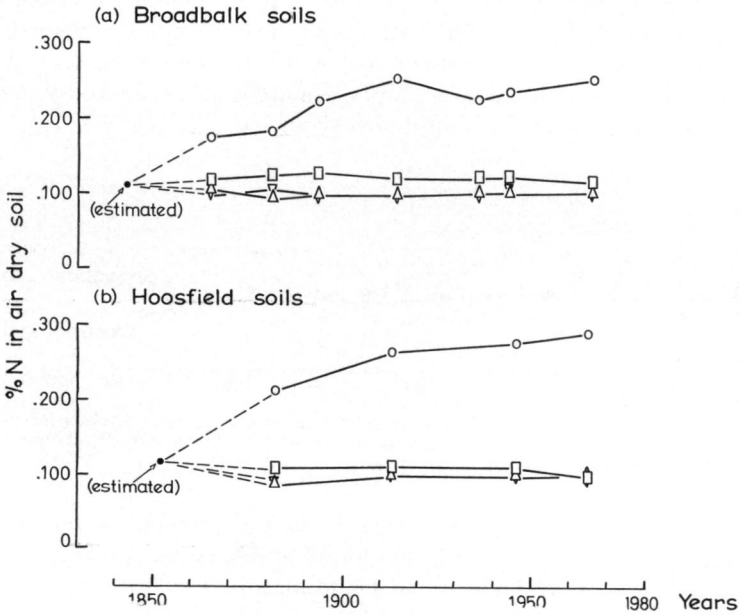


FIG. 2. — *Changes in the nitrogen content of Broadbalk and Hoosfield soils treated with*: farmyard manure, ○ ; NPK fertilisers, □ ; PK fertiliser, △ ; or unmanured, ▽.

a) Broadbalk soils
b) Hoosfield soils

TABLE 15

Effect of manuring on the total N content of soil, Broadbalk, Hoosfield and Barnfield

(JOHNSTON, 1976)

Experiment	Broadbalk	Hoosfield	Barnfield	Mean of three experiments
Year started	1844	1852	1843	
Year sampled	1966	1965	1958	
Treatment and effect	Percentage N in air dry soil 0 to 23 cm depth			
Unmanured	0.099	0.101	0.092	0.097
Effect of N	+ 0.007	+ 0.007	+ 0.006	+ 0.007
Effect of PK	+ 0.008	+ 0.009	— 0.004	+ 0.004
Effect of NPK	+ 0.016	— 0.001	+ 0.004	+ 0.006
Effect of FYM	+ 0.152	+ 0.181	+ 0.138	+ 0.157

Soil N changed much more dramatically with time on the light soil at Woburn (MATTINGLY, CHATER and JOHNSTON, 1975). On all soils without FYM percentage N decreased from 0.135 p. 100 N in 1888 to 0.103 p. 100 N in 1927. FYM, 19.7 t ha^{-1}, applied between 1877 and 1906 slightly increased soil N by 1888. Then, in 1907 the FYM dressing was decreased to 14.8 t ha^{-1} and by 1927 FYM-treated soil contained less N than in 1876 when the experiment started. Figure 3 compares changes in N content of some Woburn soils with those on unmanured soil on Broadbalk (taken from fig. 2 *a*). The lines are strikingly different. The N content of Woburn soil, about 0.156 p. 100 N in 1876, has approximately halved in 100 years whereas in the Rothamsted soil it has remained almost unchanged.

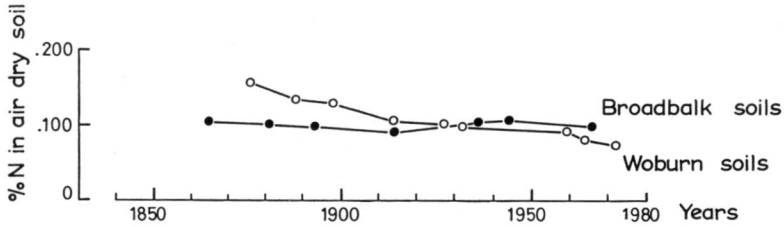


FIG. 3. — *Changes in nitrogen content of unmanured soil,* • *from Broadbalk, Rothamsted compared with those in unmanured or N only treated soil,* ○, *from the Continuous Wheat and Barley experiments, Woburn* (from MATTINGLY, CHATER and JOHNSTON, 1975).

These results from Woburn are relevant to the problem of maintaining the organic matter content of light land used for all-arable cropping. They suggest that only very large amounts of FYM would maintain soil N content.

Phosphorus

Readily soluble P is now extracted from soils using 0.5*M*-$NaHCO_3$ (pH 8.5). Unmanured Broadbalk and Hoosfield soil contains about the same amount of soluble P (table 16) but the amounts are larger than in similarly unmanured soils on Agdell or at Saxmundham (MATTINGLY and JOHNSTON, this Conference). Results from Agdell and Saxmundham suggest that at the level of soluble P in unmanured Broadbalk and Hoosfield soil cereals would respond to fresh P fertiliser. There is much more P on the unmanured Barnfield soil because some P was applied during 1843-52. These residues, which have been in the soil for more than 100 years still increase soluble P compared with the amounts on Broadbalk and Hoosfield.

Where P has been added as fertiliser or FYM, which supplied similar amounts of P (table 1), the soil now contains much soluble P. On Barnfield soils treated with N_2PKNaMg and N_2*PKNaMg both contain much the same amount of total P, 1 170 and 1 200 mg P kg^{-1}, but very different amounts of bicarbonate-soluble P, 99 and 56 mg P kg^{-1} respectively. Soils treated with N_2PKNaMg had become quite acid by the early 1950s and were limed to pH 7 ; the acidity appears to have enhanced the bicarbonate-soluble P.

Differences in the amounts of bicarbonate-soluble P in P-treated soils which have remained neutral or calcareous in these three experiments probably reflect differences in the buffering capacities of the soils.

TABLE 16

Bicarbonate-soluble P and exchangeable K in soils from Broadbalk (1), *Hoosfield* (2) *and Barnfield* (3)

Experiment Year	Broadbalk 1966	Hoosfield 1965	Barnfield 1958
Treatment	P, mg kg^{-1}, soluble in 0.5*M*-$NaHCO_3$		
Unmanured	8	5	23
PKNaMg	80	126	59
N PKNaMg	88	103	99
N*PKNaMg	67	110	56
FYM	97	102	83
	K, mg kg^{-1}, soluble in 1*N*-ammonium acetate		
Unmanured	102	87	180
PKNaMg	364	433	620
N PKNaMg	341	362	480
N*PKNaMg	319	410	450
FYM	655	758	540

(1) From JOHNSTON, 1969 *b*.
(2) From WARREN and JOHNSTON, 1967.
(3) From WARREN and JOHNSTON, 1962.

Responses by cereals to soil P (MATTINGLY and JOHNSTON, this Conference) suggest that there would be no response to fresh P on any of the P-treated soils in these experiments. Modifications to be made on Barnfield in 1977 will test this.

Potassium

The exchangeable K content of some soils from three experiments are in table 16. The unmanured soils on Broadbalk and Hoosfield contain less exchangeable K than similar soils on Barnfield which contain more clay. More than twice as much fertiliser K was applied on Barnfield than on Broadbalk or Hoosfield so fertiliser treated soils on Barnfield contain more exchangeable K. Dressings of FYM however were the same in all three experiments and more K was removed in the roots from Barnfield than in the grain and straw of the cereals on Broadbalk and Hoosfield. There is now less exchangeable K in FYM-treated soils on Barnfield than in similarly treated soils on Broadbalk and Hoosfield.

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

EXPÉRIENCES DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE SUR MONOCULTURE DANS LES STATIONS EXPÉRIMENTALES DE ROTHAMSTED ET DE WOBURN : EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LES RENDEMENTS ET L'ANALYSE DES SOLS, ET BUT ET PLAN DES MODIFICATIONS INTRODUITES RÉCEMMENT

Ce mémoire fait l'historique de six expériences de longue durée et discute les effets des traitements sur les rendements et sur les sols, ainsi que le but des modifications introduites récemment. Quatre de ces expériences sont situées à Rothamsted, et les deux autres à Woburn. Les cultures sont les suivantes : blé d'hiver sur le champ désigné par 'Broadbalk', 1844-1975 ; plantes racines sur 'Barnfield', 1843-1975 ; orge de printemps sur 'Hoosfield', 1852-1975 ; céréales sur 'l'Exhaustion Land', 1856-1975 ; et blé et orge à 'Woburn', 1876-1975.

Jusqu'à tout récemment les mêmes cultures se succédaient tous les ans sur les mêmes parcelles. Quoique la pratique de l'assolement fût bien établie dans les années 1840, LAWES et GILBERT avaient considéré qu'en rompant avec la tradition et en cultivant une plante en monoculture, il serait possible de comprendre ses besoins nutritionnels.

Les expériences de Rothamsted sont établies sur sol limono-argileux (20 à 28 p. 100 d'argile) contenant un peu de $CaCO_3$ (1 à 3 p. 100) et celles de Woburn sur sol sablo-limoneux (10 p. 100 d'argile) légèrement acide à l'origine.

Les rendements des parcelles sans engrais ou avec fumier de ferme ont été mesurés et comparés à ceux des parcelles recevant des substances inorganiques contenant NPKNaMgSi, appliquées seules ou en combinaisons variées. En général, on n'a testé qu'une seule dose de fumier et de PKNaMg, mais plus de K était apporté aux plantes racines qu'aux céréales. La quantité d'éléments fertilisants apportée par les engrais et le fumier excédait celle prélevée par les meilleures récoltes. On a comparé plusieurs doses d'azote, ainsi que les formes de l'azote apporté (nitrique et ammoniacal). A la suite de modifications récentes, les mêmes doses de fumier et de PKMg ont été maintenues, mais tout l'azote est apporté maintenant sous la forme de 'Nitro-Chalk' et on compare aussi des doses d'azote plus élevées.

Les premiers résultats ont démontré de façon concluante que les engrais minéraux pouvaient produire le même rendement que le fumier, que l'azote était plus important que PKNaMg, et qu'une nouvelle dose d'engrais azoté était nécessaire tous les ans. P s'est révélé plus important que K pour l'orge sur le sol plus lourd de Rothamsted. L'altération des minéraux argileux fournit probablement encore assez de K pour une récolte de céréale atteignant environ 5 t de grains à l'hectare. Sur Broadbalk, on a testé K, Na et Mg appliqués séparément et à doses équivalentes ; les rendements ont peu varié, sans doute parce que Na et Mg ont provoqué une libération additionnelle de K dont le blé a pu bénéficier.

Le sulfate d'ammoniaque qui a été, depuis longtemps, une source importante d'engrais azoté, a provoqué une augmentation des pertes de $CaCO_3$ dans les couches supérieures du sol. Les sols qui en ont reçu les doses les plus fortes, particulièrement ceux qui contenaient peu de $CaCO_3$, ont subi une telle acidification que les récoltes en ont été réduites. On utilise aujourd'hui peu de sulfate d'ammoniaque mais les sols continuent à perdre du $CaCO_3$. Les résultats de ces expériences ont démontré comment l'acidification des sols peut provoquer une sérieuse réduction des récoltes, alors que c'est là un des phénomènes les plus faciles et les moins coûteux à corriger.

Le désherbage a toujours été un problème, particulièrement en ce qui concerne les céréales semées en automne. Jusqu'à la première moitié des années 1920, même les céréales étaient régulièrement soumises à un binage manuel, mais cette pratique devint trop coûteuse et, sur Broadbalk, un cinquième du champ fut tour à tour mis en jachère une fois tous les cinq ans. En ce qui concerne l'orge de printemps, le désherbage était plus facile, les plantules de mauvaises herbes étant éliminées par les façons culturales de la fin du printemps. On utilise maintenant des herbicides sur la totalité du champ de Broadbalk, exception faite pour une toute petite partie. Quoique sur Broadbalk la jachère fut introduite par nécessité, elle conduisit au développement de quatre programmes de recherche importants : la biologie des plantes adventices, les insectes nuisibles, l'effet de la jachère sur la fourniture d'azote et sur les rendements, et l'incidence des maladies cryptogamiques sur le blé.

Même au cours des premières années, LAWES et GILBERT avaient prélevé des échantillons de sol, et les changements dans le taux des éléments fertilisants ont pu être ainsi mesurés. Les sols recevant des engrais minéraux ont accumulé très peu d'azote à Rothamsted et en ont perdu beaucoup à Woburn ; c'est seulement dans les sols ayant reçu annuellement de fortes doses de fumier

qu'on a pu noter un accroissement de la teneur en azote. Jusqu'à tout récemment, sur Broadbalk, environ 40 p. 100 seulement de l'azote apporté par les engrais minéraux et moins de 20 p. 100 de celui amené par le fumier étaient exportés par les récoltes. Même après 130 ans, moins de 5 p. 100 de l'azote provenant des engrais azotés et moins de 15 p. 100 de l'azote du fumier se retrouvent dans le sol.

Dans les parcelles ayant reçu du superphosphate, tout le P résiduel se trouve dans la couche arable du sol ; dans les parcelles avec fumier, une légère quantité de P est passée dans le sous-sol. En ce qui concerne le K, son accumulation dans le sol a varié avec la quantité de K apportée, la culture et la quantité de K prélevée par cette culture.

On a évalué les effets résiduels de P et K sur une série de cultures. Les sols contenant P ou K résiduels ont toujours donné des rendements supérieurs à ceux des sols qui n'en contenaient pas, à la condition que tous les autres éléments fertilisants y aient été présents en quantité suffisante. En général P s'est révélé plus efficace que K surtout à Rothamsted où les sols libèrent encore un peu de K tous les ans. L'introduction de nouvelles applications de P ou de K dans l'essai a produit des résultats plus variables. Dans certains sols, une nouvelle application d'engrais à un sol appauvri n'a pas élevé les rendements comparativement à ceux obtenus dans un sol enrichi mais sans nouvelle addition d'engrais. Dans d'autres sols, une nouvelle application d'engrais a produit les mêmes rendements sur sol appauvri comme sur sol enrichi. On ignore les raisons pour lesquelles ces sols se comportent différemment ; des différences de structure pourraient être invoquées.

Le résultat le plus important de ces expériences est peut-être le fait que les rendements, particulièrement en ce qui concerne les céréales, n'ont pas diminué après plus de cent ans de culture continue. Les derniers rendements ont été les plus forts, en partie parce que les variétés utilisées aujourd'hui donnent de meilleurs rendements, et en partie en raison de l'amélioration des façons culturales, y compris meilleur désherbage et meilleur contrôle des parasites et des maladies. Les maladies et les parasites transmis aux plantes par l'intermédiaire du sol n'ont été étudiés systématiquement que tout récemment. On était à peine averti de leur importance au cours des années 1840, quoique nous sachions aujourd'hui que le succès de l'assolement était dû au contrôle que les rotations exerçaient sur eux. On compare maintenant les rendements du blé et de l'orge en culture continue et en rotation sur Broadbalk et sur Hoosfield. En général, les rendements maxima sont produits par les cultures en rotation, et la dose optimum d'azote se trouve généralement inférieure à celle requise par les céréales en culture continue.

Une autre modification récente consiste à apporter de l'azote minéral aux parcelles avec fumier. Ces parcelles, ayant reçu du fumier pendant de nombreuses années, contiennent plus de matière organique que celles traitées aux engrais minéraux. Le rendement des plantes racines est notablement plus élevé sur les parcelles avec fumier et azote minéral que sur les parcelles ne recevant que des engrais minéraux ; mais il y a peu de différence dans le rendement des variétés modernes de céréales sur les deux sols à la dose optimum de N. On se propose aussi d'étudier ultérieurement l'effet de l'accroissement de la matière organique du sol sur des prairies temporaires de durée variée.

ZUSAMMENFASSUNG

VERSUCHE BEZÜGLICH DES FORTLAUFENDEN WACHSTUMS BESTELLBAREN KULTUREN IN DEN VERSUCHSZENTREN VON ROTHAMSTED UND WOBURN : WIRKUNGEN DER BEHANDLUNGEN AUF DIE KULTURERTRÄGE UND BODENANALYSEN UND NEUE VERÄNDERUNGEN VOM ZIEL UND PLAN

In dieser Mitteilung werden sechs Feldversuche beschrieben, die zwischen 1843 und 1877 angefangen worden sind Alle gehen noch mit verschiedenen Veränderungen weiter und die Ergebnisse für verschiedene zwischen 1843 und 1975 erfassten Perioden sind gegeben. Die Versuche betrafen zuerst den Nährstoffbedarf von Weizen-, Gerste- und Rübemonokulturen. Die Erträge mit und ohne Stallimist werden bestimmt und mit den mit getrennten oder verschieden kombinierten mineralischen NPKNaMgSI Gaben erzielten Erträgen verglichen. Diese Versuche zeigten bald dass die chemischen Dünger die selben Erträge wie der Stallmist ergeben und lassten die relative Bedeutung von N, P und K für die verschiedenen Kulturen hervortreten.

Alle die studierten Dünger lieferten mehr Nährstoffe als die Kulturen davon ausnutzzten. Fast alle die Rückstände der N-Düngung wurden aus dem Boden weggenommen ; etwas N hat sich in den mit Stallmistdüngung angereicherten Böden angehaüft, aber davon ist auch in diesen,

Böden viel verlorengegangen. Das meiste der P-Rückstände ist in der Ackerkrume geblieben, aber etwas K wanderte in den Untergrund. Die P und K Rückstände können durch Zunahmen, vom bicarbonatlöslichen P und vom austauschbaren K nachgewiesen sein, aber keine dieser Methoden zur Bodenanalyse erlaubt eine Schätzung de gesamten Bodengehalts an pflanzenaufnehmbaren P und K. Doch zeigten die Feldversuche dass die Rückstände für eine ganze Reihe von Kulturen verfügbar sind. Im laufe gewisser Vergleichsuntersuchungen waren die Erträge auf Böden mit Rückständen immer besser als auf Böden ohne Rückständen, auch wenn ein ganz neues Düngemittel studiert war.

Die Böden, denen jährlich eine Stallmistschicht während mehr als 100 Jahre verabreicht wurde, enthalten heute mehr organische Stoffe als die, denen nur chemische Dünger verabreicht wurden. In den letzten Jahren wurden Sorten mit höher Ertragsleistung und verbesserte Kulturtechniken mit Unkraut-, Schädlings- und Krankheitsbekämpfung eingeführt. Während dieser Periode waren die Erträge der Rüben- und Getreidekulturen in Fruchtfolge auf die mit Stallmist angereicherten Böden besser als auf die mit chemischen Düngern angereicherten Böden. Diese Differenz kann nicht mit den im Frühling verabreichten N-Düngerschichten erkluärt werden ; nähere Untersuchungen werden unternommen.

РЕЗЮМЕ

Опыты монокультуры временных культур на экспериментальных станциях в Ротхемштете и Вобэрне. Действие различных обработок на урожайность и анализы почв. Недавние изменения целей и организации экспериментов.

А. Е. ДЖОНСТОН, Г.Е.Г. МЭТТИНГЛИ.

В данной работе описываются 6 полевых опытов, заложенных между 1843-м и 1877-м годом. Все эти опыты продолжаются до сих пор с некоторыми изменениями, и в этом труде даются результаты, полученные в различные периоды с 1843-го до 1975-го года. Сначала в этих опытах изучались нужды монокультур пшеницы, ячменя и пропашных культур в питательных элементах. Урожайность на почвах без удобрений и удобренных навозом, определялась и сравнивалась с урожайностью на почвах получавших N, P, K, Na, Mg, Si в форме минеральных соединений, внесенных по отдельности, или в различных комбинациях. Опыты эти очень скоро показали, что применение минеральных удобрений давало возможность получать урожаи того-же уровня, что и применение навоза, и что для некоторых культур применение минеральных удобрений играет довольно важную роль.

Все испробованные удобрения приносили в почву количества питательных элементов большие чем те, которые выносились урожаями. Неиспользованный остаточный азот был почти полностью потерян почвой; некоторые количества этого элемента накоплялись, правда, в почвах получавших навоз, но даже в этом случае большая часть азота терялась. Большая часть остаточного фосфора оставалась в пахотном слое, но некоторое количество калия мигрировало в под-почву. Остаточные количества P и K можно определить по увеличению содержания растворимого фосфора в бикарбонате и по увеличению содержания обменного калия; но не существует метода определения общего количества усвояемых (растениями) P и K в почве. Полевые опыты показали однако, что остаточные количества этих элементов могут быть усвоены большим числом культур. В некоторых сравнительных изучениях урожайность всегда была повышенной на почвах содержавших остаточные количества пита-

тельных элементов, даже тогда, когда в эксперименте испробывалась повышенная доза какого-нибудь нового удобрения.

Почвы, получавшие ежегодно навоз, в течении более ста лет, содержали более крупные запасы органического вещества, чем почвы обрабатывавшиеся с помощью только минеральных удобрений. Недавно в опыты были введены более продуктивные сорта, улучшена практическая сторона обработок, введена была также борьба с сорняками, вредителями и болезнями. В течении этого нового периода урожайность культивируемых в севооборотах пропашных и злаков больше увеличилась на почвах получавших навоз, чем на почвах получавших минеральное удобрение. Эту разницу невозможно об' яснить весенними подкормками азотом, и поэтому в настоящее время начаты новые исследования для выяснения этого вопроса.

REFERENCES

COOKE G. W. (this Conference). *Long term fertiliser experiments in England : The significance of their results for agricultural science and for practical farming.*

GARNER H. V., DYKE G. V., 1969. The Broadbalk Yields. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1968, Pt, **2**, 26-49.

GLYNNE M. D., 1969. Fungus diseases of wheat on Broadbalk 1843-1967. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1968, Pt **2**, 116-140.

JOHNSON C. G., LOFTY J. R., CROSS D. J., 1969. Insect Pests on Broadbalk. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1968, Pt **2**, 141-156.

JOHNSTON A. E., 1969 *a*. Plant nutrients in crops grown on Broadbalk. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1968, Pt **2**, 50-62.

JOHNSTON A. E., 1969 *b*. Plant nutrients in Broadbalk soils. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1968, Pt **2**, 93-112.

JOHNSTON A. E., 1970. The value of residues from long-period manuring at Rothamsted and Woburn. III. The experiments made from 1957 to 1962, the soils and histories of the sites on which they were made. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1969, Pt **2**, 22-38.

JOHNSTON A. E., 1975. Experiments made on Stackyard Field, Woburn, 1876-1974. I. History of the Field. Details of the Cropping and Manuring and the Yields of the Continuous Wheat and Barley experiments. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1974, Pt **2**, 29-44.

JOHNSTON A. E., 1976. Additions and removals of nitrogen and phosphorus in long-term experiments at Rothamsted and Woburn and the effect of the residues on total soil nitrogen and phosphorus. In : *Agriculture and Water Quality. Tech. Bull. Minist. Agric. Fish. Fd* No. 32, 111-144.

JOHNSTON A. E., GARNER H. V., 1969. The Broadbalk Wheat Experiment : Historical Introduction. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1968, Pt **2**, 12-25.

JOHNSTON A. E., CHATER M., 1975. Experiments made on Stackyard Field, Woburn, 1876-1974. II. Effects of treatments on soil pH, P and K in the Continuous Wheat and Barley experiments. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1974, Pt **2**, 45-60.

JOHNSTON A. E., POULTON P. R., 1977. Yields on the Exhaustion Land and changes in the NPK content of the soils due to cropping and manuring 1852-1974. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1976, Pt **2**, (in press).

JOHNSTON A. E., WARREN R. G., PENNY A., 1970. The value of residues from long-period manuring at Rothamsted and Woburn. IV. The value to arable crops of residues accumulated from superphosphate. V. The value to arable crops of residues accumulated from potassium fertilisers. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1969, Pt **2**, 39-90.

LAWES J. B., GILBERT J. H., 1895. The Rothamsted Experiments. *Trans. R. Highld. agric. Soc. Scotl.*, Ser 5, **7**, 11-354.

LIEBIG J., 1843. *Organic chemistry in its application to agriculture and physiology.* 3rd edition London : Taylor and Walton, 387 pp.

MATTINGLY G. E. G., CHATER M., JOHNSTON A. E., 1975. Experiments made on Stackyard Field, Woburn, 1876-1974. III. Effects of NPK fertilisers and farmyard manure on soil carbon, nitrogen and organic phosphorus. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1974, Pt **2**, 61-77.

MATTINGLY G. E. G., JOHNSTON A. E. (this Conference). Long term rotation experiments at Rothamsted and Saxmundham Experimental Stations : The effects of treatments on crop yields and soil analyses and recent modifications in purpose and design.

ROTHAMSTED EXPERIMENTAL STATION, 1974. Guide, Harpenden : 78 pp.

RUSSELL E. J., 1916. Chalking : a useful improvement for clays overlying the chalk. *J. Bd Agric. Fish.*, **23**, 625-633.

RUSSELL E. J., VOELCKER J. A. (ed.), 1936. *Fifty years of field experiments at the Woburn Experimental Station.* London : Longmans Green and Co., 392 pp.

RUSSELL E. J., WATSON D. J., 1938. The Rothamsted field experiments on barley, 1852-1937. Pt I, II and III. *Emp. J. exp. Agric.*, **6**, 268-292, 293-314 ; **7**, 193-220.

RUSSELL E. J., WATSON D. J., 1940. The Rothamsted field experiments on the growth of wheat. *Tech. commun. imp. Bur. Soil Sci.*, No, 40.

THURSTON J. M., 1969. Weed studies on Broadbalk. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1968, Pt **2**, 186-208.

THURSTON J. M., WILLIAM E. D., JOHNSTON A. E. (this Conference). Modern developments in an experiment on permanent grassland, started in 1856 : Effects of fertilisers and lime on botanical composition and crop and soil analyses.

VOELCKER J. A., 1923. The Woburn Experimental Farm and its work, 1876-1921. *Jl R. Agric. Soc.*, **84**, 110-166.

WARREN R. G., JOHNSTON A. E., 1960. The Exhaustion Land Site. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1959, 230-239.

WARREN R. G., JOHNSTON A. E., 1962. Barnfield. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1961, 228-247.

WARREN R. G., JOHNSTON A. E., 1967. Hoosfield Continuous Barley. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1966, 320-338.

WATSON D. J., RUSSELL E. J., 1943. The Rothamsted experiments on mangolds, 1876-1940. I. Effect of manures on yield of roots. *Emp. J. exp. Agric.*, **11**, 49-64.

YOUNG A., 1813. *General view of the agriculture of Hertfordshire*, London, 236 pp.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 957-968.

RESULTS OF LONG-TERM FERTILIZER EXPERIMENTS ON PADDY RICE IN JAPAN

H. MATSUO*, T. HAYASE**, H. YOKOI** and Y. ONIKURA***

* *Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome (Italy)*

** *National Institute of Agricultural Sciences, Tokyo (Japan)*

*** *Central Agricultural Experiment Station, Konosu (Japan)*

SUMMARY

In this paper, the selected four experiments on rice in Japan were reported, viz., KONOSU (50 years), AOMORI (32 years), AICHI (42 years) and HOKKAIDO (41 years). Although these experiments were somewhat different in details, they aimed at examining the effects of organic and mineral fertilizers, especially fertilizer elements on paddy rice.

The general summary on the results obtained from these four experiments was as follows :

1. The effect of mineral fertilizers on rice was recognized to be at nearly the same level as that of organic fertilizers, except in the case for special soils such as phosphorus or potassium deficient ones.

2. Of the fertilizer elements, nitrogen is the most important limiting factor, which is followed by phosphorus and potassium.

3. Rice yields have been increased slightly by the continuous application of compost although its effect was not apparent in the beginning.

4. The rice grown in the compost, phosphorus and nitrogen plots showed strong resistance to damage due to cold which attacked the areas in question in particular years. It is therefore recommended to apply phosphorus and nitrogen sufficiently, as well as compost, in these areas.

5. The soil has been slightly changed by the organic fertilizer application in its chemical characteristics, especially carbon and nitrogen contents, mineralization of nitrogen, etc.

6. Under constant pressure of urbanization the eutrophication of irrigation water has taken place, which disturbed the experimental results seriously. The experiments were therefore either stopped or moved out to fresh sites.

INTRODUCTION

Japan is located on the edge of the Asian monsoon region and thereby rice is planting as her most important staple food. Rice has been tradionally planted in everywhere in the country where water is available. National economy is strongly affected by production of rice, which is controlled on marketing by the Government.

Acreages of paddy rice reach to about three million hectares that are almost one-half of the total arable lands. Most of all paddy fields is irrigable in summer of the planting season.

Under a constant population pressure, the national rice production has increased steadily, mostly contributed by the increase of per-hectare yield. Especially, after the War II the per-hectare yield increased remarkably and the production stands still after reaching the surplus in 1970. National average of per-hectare yield is about 5 t/ha in brown rice basis.

Generally, rice is grown in waterlogged soils either mostly by transplanting of seedlings or direct seeding. It is well known that the surface soil of waterlogged fields loses oxygen stocked in the soil soon and tends to be chemically reduced by microbial activities. In the reduced layer of soil, ammonium-N, ferrous-iron, manganous-manganese, sulphides of sulfur, etc. are then produced as the stable products. Many different types of production technology have been developed with the progresses of basic research works, such as chemical changes happened in the surface soil, etc. However, those techniques were mostly contrived by the strong request for increasing per-hectare yield presented by farmers.

Due to the impact of a constant urbanization, most of the agricultural stations were forced to move in the up-country. It means that there are quite few numbers of field experiments exceeding more than 40 years of continuation, in spite of the importance of rice for the people. Of the rare number of long-term experiments, some of the fertilizer experiments in fields are reported in this paper.

A. — EFFECTS OF ORGANIC AND MINERAL FERTILIZERS TO PADDY RICE : CENTRAL AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION

Duration of the Experiment : Since 1926 to present (50 years at 1976).
Location : Konosu-city, Saitama Prefecture.
Topography : Flood plain along the Arakawa River.
Soil profile characteristics : Fine textured, Gray-brown clay soil.
— 0-14 cm : dark-brown ; clay loam ; carbon content 1.8 p. 100 ; cation exchange capacity (CEC) 15 me/100 g soil.
— 14-20 cm : yellowish brown ; clay loam ; carbon content 0.8 p. 100.
CEC 16 me/100 g soil.
— 20-35 cm : yellowish gray ; sand.
— 35-100 cm : yellowish brown : light clay.

Natural physical conditions :

a) Mean temperature ; 15°C.
b) Annual average precipitation ; 1 500 mm.
c) Annual average evaporation by pan ; 650 mm.
d) Percolation rate of the experiment field ; 20 mm/day at peak period.
e) Water use ; continuous irrigation during the season.

A. 1. — *Experimental design*

Purpose : To clarify the effects of continuous application of organic and mineral fertilizers to paddy rice, in regard to the improvement of soil fertility for rice.

Treatments : Four treatments in three replications are shown in table 1.

TABLE I

Treatments of the experiment (Unit : kg/ha)

Name of plot	Soybean cake	Compost	Green manure	Lime	Total amount		
					N	P_2O_5	K_2O
Mineral fertilizers (1) ...	—	—	—	—	10.5	4.95	10.0
Organic fertilizers	600	12,000	—	—	10.3	6.4	9.7
Green manure (2)	—	—	23,000	1,000	11.0	5.4	10.0
Control	—	—	—	—	—	—	—

(1) 500 kg/ha of ammonium sulphate in total, 300 kg for basal and 200 kg for topdressing, and 300 kg/ha of single superphosphate and 200 kg/ha of K_2SO_4 were applied

(2) Chinese milk vetch (*Astragalus Chinensis*) was applied.

A. 2. — *Results obtained on rice yield*

Since the weight of brown rice is traditionally used as the unit of measuring rice yield, the yield results are also expressed under this basis. The results obtained during 45 years period are shown in table 2, as the average yield in every five years from the beginning.

TABLE 2

Average yields in every five years

Period	Inorganic		Organic		Green manure		Control	
	(kg/ha)	(%) (2)	(kg/ha)	(%) (2)	(kg/ha)	(%) (2)	(kg/ha)	(%) (2)
1-5	2.890	146	2.670	135	2.810	142	1.980	100
6-10	2.830	169	2.670	160	2.820	169	1.670	100
11-15	3.280	194	3.370	199	3.320	196	1.690	100
17-20 (1)	3.160	177	3.130	175	3.190	178	1.720	100
21-25	3.090	173	3.020	169	2.910	163	1.790	100
26-30	3.350	181	3.350	181	3.290	178	1.850	100
31-35	3.290	198	3.470	208	3.820	229	1.670	100
36-40	4.200	196	4.560	213	4.120	193	2.140	100
41-45	3.830	144	3.890	146	3.800	143	2.660	100
46-50	3.788	125	3.844	125	—	—	3.029	100
Average	3.367	167	3.400	168	3.340	175	2.022	100

(1) The 16th experiment could not be yielded due to the damages by deep flooding.

(2) The ratio of yield to the control in per cent.

A. 3. — *Changes in some soil properties due to the treatments after 40 years' period*

After 40 years' period, the soils taken from each treatment plots were chemically analyzed ; the results are shown in table 3.

TABLE 3

Changes in soil chemical characteristics due to the treatments

Treatment	pH 1 : 2.5	Total carbon (%)	Total nitrogen (%)	C/N ratio	CEC me/100g	Exchangable me/100 g			Mineralization (1) mg/100 g
						Ca	Mg	K	
Control	5.8	2.25	0.203	11.1	15.3	13.0	3.7	0.3	8.6
Inorganic	5.6	2.89	0.245	11.8	17.1	13.2	2.9	0.5	14.8
Organic	6.3	3.78	0.325	11.6	17.7	13.0	3.1	0.7	22.3
Green manure .	6.8	2.95	0.286	10.3	15.7	17.3	2.9	0.5	15.5

(1) Mineralization of soils : Ammonium-N of the sample soil is analyzed after a 4-week incubation of the sample under flooding condition kept at 30°C.

A. 4. — *Discussion and Summary*

a) After a period of 45 years, the yield differences between the three treatments and the control are significantly clear, but among those of the three treatments there are no significant differences.

b) However, the effect of organic fertilization could not appear at the beginning, while that of green manuring appeared from the beginning.

c) Of the chemical properties of the soils, the increases in carbon content and mineralization of soil nitrogen clearly appeared for the organic fertilizer plots, including the green-manure plot.

It should be noted that there seems to be no differences on the cation exchange capacity of soil among those treated soils.

d) From this long-term experiment, it may be concluded that the application of inorganic fertilizers can give about the same effect to rice yield as that of organic fertilizers. Or, in other words, there may be no differences of rice yield among any kinds of nitrogenous fertilizers in either organic or/and inorganic forms.

e) Due to the eutrophication of irrigation water that took place clearly from after 40 years, the control yield has been rising remarkably. However, the same irrigation water could not give any affects to the fertilized plots.

B. — EFFECTS OF COMPOST APPLICATION TO PADDY RICE : AOMORI PREFECTURAL EXPERIMENT STATION

Duration of the Experiment : 32 years, 1930-1961.
Location : Kuroishi-city, Aomori Prefecture.
Topography : Flood plain.

Soils : Alluvial soil ; originated mostly from volcanic ash soils.

Texture of the surface soil ; coarse sand 26.7 p. 100, fine sand 28.2 p. 100, silt 31.4 p. 100 and clay 13.7 p. 100 ; Loam.

Natural physical conditions :

a) Mean temperature, 9°C.
b) Annual precipitation, 1 300 mm.
c) Days of snowing, 107 days (> 10 cm).
d) Water use, continuous irrigation during the season.

B. 1. — *Experimental design*

Purpose : To clarify the effects of continuously applying compost to paddy rice, in connection with the use of mineral fertilizers.

Treatments : Large plots consist of 4 treatments ; compost used : 0, 5.63, 11.25 and 18.75 t/ha (67 p. 100 of moisture).

Small plots consist of 5 treatments : N = 0, 37.5, 56.3, 75.0, 93.8 kg/ha, applied in basal dressing.

All plots were received 56.3 P_2O_5 and 75.0 K_2O kg/ha respectively.

In this report, the results obtained from selected 4 treatment plots are reported such as those : compost, 0 (MO), 5.63 ton (M6), 11.25 ton (M11) and 18.75 ton (M18)/ha, with the uniform application of 56 kg N, 56 kg P_2O_5 and 75 kg K_2O/ha.

B. 2. — *Results obtained*

In table 4, the average yields of brown rice in the period of 5 years during the experimental period are shown about the selected four plots only.

TABLE 4

Average yield of brown rice (kg/ha)

Treatment	1-5	6-10	11-15	16-22	23-28	Meaf	P. 100
M 0	4,400	3,950	3,830	4,170	4,040	4,080	100
M 6	3,970	4,300	4,200	4,430	4,670	4,320	105
M 11	3,910	4,450	4,510	4,670	5,110	4,540	111
M 18	3,740	4,570	4,570	4,800	5,350	4,620	113

In table 5, changes in some of the soil chemical properties due to the continuous application of compost are given after 32 years of experiment.

TABLE 5

Changes in soil characteristics happened in the treatment plots

Item Soil layer (1)		Total C (%)		Total N (%)		C/N		CEC me/100 g		Sol. SiO_2 (%)	
		I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Treatment	M 0 ...	2.36	2.3	0.22	0.21	10.7	10.6	15.5	16.8	13.4	19.2
	M 6 ...	2.86	2.43	0.26	0.22	11.0	11.0	17.2	17.3	12.0	16.4
	M 11 ..	3.43	2.16	0.32	0.21	10.7	10.3	19.6	16.3	12.2	14.9
	M 18 ..	3.95	2.72	0.37	0.24	10.7	11.3	21.1	17.9	11.0	13.8

(1) I-layer, 0-13 cm. II-layer, 13-18 cm.

B. 3. — *Discussion and Summary*

1. Rice yields have been increased by the continuous compost application, though the effect could not appear in the beginning.

2. The yield increased with increasing amounts of applied compost. The optimum amounts of compost to rice yields might exist in the range of 6 to 11 t/ha.

3. Changes in some of the soil properties are mostly happened in only the surface ploughed layer of the soil. Especially, the total carbon content of the soil was changed to a higher level with the increasing use of compost and thereby the total nitrogen tends to follow the same way as carbon content.

4. It was found that the rice grown in the compost plots was strongly resistant to the cold damages which took place occasionally in particular years. In this experiment, the cold damages on rice occurred in 1940, 1941, 1945 and 1954, respectively, and the application of compost could give remarkable yield increases in more than 20 p. 100 up from the control. The reason why the compost application can give such special resistability of rice to cold damages has not been clarified yet.

C. — EFFECTS OF FERTILIZER ELEMENTS TO PADDY RICE : AICHI PREFECTURAL AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION

Duration of the Experiment : 41 years, 1926-1966.
Location : Anjyo-city, Aichi Prefecture.
Topography : Terraced paddy on undulated hills.
Soils : Diluvial soil ; originated from granitic sedimentary rocks.
I : 0-16 cm, clay loam, gray-brown, sticky.
II : 16-24 cm, clay loam, gray-brown, sticky.
III : 24-100 cm, clay loam, light yellowish brown, very sticky.
Natural physical conditions :
a) Mean temperature, 15°C.
b) Annual precipitation, 1 500 mm.

C. 1. — *Experimental design*

Purpose : To clarify the effects of fertilizer elements (N, P, K and Ca) to rice culture, especially to examine the natural supply of those elements during the long period of experiment.

Treatments : Nine treatments are shown in table 6.

C. 2. — *Results obtained*

In table 7, the average yields of brown rice in period of 5 years since the beginning time are shown.

When the average yield of NPKCa- plots is taken as 100, the following ratios are obtained for each yield of those plots : control 40, lime 45, ON 57, OP 43, OK 86, OCa 94, Compost (1) 110 and compost (2) 122, respectively.

From the results of nutrient uptake by rice plants in the last year, the natural available amounts of N, P and K and the percentage utilization of fertilizers are calculated and shown in table 8.

TABLE 6

Treatments (kg/ha)

	N (1)	P_2O_5 (1)	K_2O (1)	Compost	Lime
Control	—	—	—	—	—
Lime	—	—	—	—	1,100
ON (P + K)	0	75	56	—	1,100
OP (N + K)	94	0	56	—	1,100
OK (N + P)	94	75	0	—	1,100
No Lime	94	75	56	—	—
N + P + K + Ca	94	75	56	—	1,100
(7) + Compost 7,500 kg	94	75	56	7,500	1,100
(7) + Compost 22,500 kg	94	75	56	22,500	1,100

(1) From 1956, N 85 kg, P_2O_5 82 kg and K_2O 56 kg/ha.

TABLE 7

Average yields of brown rice (ton/ha)

	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	Average
Control	1.63	1.72	1.52	1.24	1.62	1.53	1.25	1.07	1.45
Lime	2.04	1.79	1.83	1.28	1.79	1.75	1.46	1.07	1.63
ON	1.98	2.08	2.28	1.88	2.44	2.42	1.89	1.60	2.07
OP	2.55	1.33	1.81	1.03	1.87	1.67	1.20	0.84	1.54
OK	2.69	2.72	3.21	2.82	3.43	3.12	3.63	3.23	3.11
No Lime	3.32	3.15	3.64	3.14	3.68	3.68	3.44	3.11	3.40
NPKCa	3.49	3.47	3.62	3.40	3.89	3.96	3.47	3.54	3.61
Compost (1)	3.56	3.68	4.01	3.72	4.25	4.32	4.05	4.06	3.96
Compost (2)	3.80	3.92	4.61	4.48	4.71	4.59	4.64	4.59	4.42

Remarks : Typhoon hit the field at 6, 12, 16, 20, 26, 28, 34 and 36 years, respectively.

TABLE 8

Natural available amounts and the percentage utilization of N, P and K

	Natural available amount (kg/ha)	Percentage utilization (%)
N	31.0	48.3
P_2O_5	5.8	35.5
K_2O	70.0	28.6

After 41 years, the soil samples were taken from each plots profiles and chemically analyzed on some of soil characteristics, of which few selected one are shown in table 9.

TABLE 9

Changes in chemical characteristics due to treatments (1)

	pH 1 : 2.5	C (%)	N (%)	C/N	Available P_2O_5 mg/100 g	CEC me/100 g	Exchangeable me/100 g		Available SiO_2 mg/100 g
							Ca	Mg	
Control	5.9	0.86	0.087	9.9	2.1	7.53	3.41	0.79	10.1
Lime	7.1	0.88	0.080	11.0	1.8	9.04	6.56	1.00	40.4
ON	7.0	0.98	0.084	11.7	31.4	8.22	6.72	0.79	20.7
OP	6.9	0.84	0.082	10.2	tr	8.76	6.46	0.63	34.6
OK	6.7	1.03	0.081	7.9	13.6	8.50	6.56	0.37	15.1
No Lime	5.4	0.95	0.092	10.3	21.5	7.40	3.10	0.21	5.1
NPKCa	6.4	1.00	0.096	9.6	14.6	7.26	5.98	0.32	14.4
Compost (1) .	6.5	1.24	0.114	10.9	15.8	8.22	6.67	0.32	17.2
Compost (2) .	6.4	1.80	0.153	11.8	23.0	9.72	6.72	0.53	13.1

(1) Figures are shown only on the surface ploughed layer soils, as air-dry soil basis.

C. 3. — *Discussion and Summary*

1. Poor rice growth was observed on the treatment plots of control, lime single and no nitrogen, respectively from the beginning. For the no phosphorus plot, the phosphorus deficiency symptom appeared on rice leaves after 6-9 years of normal growth. There were no differences on growth for the plots of no potassium, N + P + K and N + P + K + Ca and the excessive growth was observed on all compost plots.

2. Brown rice yields were higher in order of the treatments of N + P + K + Ca, N + P + K and following by no potassium plot. Yields of no phosphorus plot were less than those of control after gradual drops in 6 to 9 years. The compost plots yielded at the highest level during the whole period.

3. Extremely poor contents of phosphorus were observed for rice plant from the no phosphorus plot with a sharp contrast of showing very high contents of nitrogen. No significant differences were observed for the uptakes of N, P, K and Ca by rice plant in other treatment plots than the no-phosphorus.

4. Increases in soil acidity were found in the control and the N + P + K plots, while that for the other plots was at about neutral. Available phosphorus of soil in the no phosphorus plot showed only traces, but the soil was rich in other available elements. Organic matter contents increased significantly in both compost plots.

Due to increasing acidity, the available silica content was in the minimum figure for the no lime (N + P + K) plots.

5. In general, compost application has given a yield increase for rice and changed soil chemical and physical properties for the direction of increasing soil fertility.

D. — EFFECTS OF FERTILIZER ELEMENTS TO PADDY RICE : HOKKAIDO AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION

Duration of the experiment : 41 years, 1926-1966.
Location : Sapporo-city, Hokkaido.
Topography : Flat plane.
Soils : Alluvial soil.
Natural climatic condition : Mean temperature in summer 20°C ; Rainfall 1 200 mm (annual).

D. 1. — *Experiment design*

Purpose : As the area of Hokkaido is the northernmost for rice cultivation, the effects of three fertilizer elements have to be clarify in connection with their responses to the cold weather which occasionally reduces rice yield heavily.

Treatments : The treatments are shown in table 10.

TABLE 10

Treatment of the plot (kg/ha)

	N	P_2O_5	K_2O
Control (C)	—	—	—
O N (P + K)	—	75	75
O P (N + K)	75	—	75
O K (N + P)	75	75	—
N + P + K	75	75	75
Single N	75	—	—
Single P	—	75	—

D. 2. — *Results obtained*

In table 11, rice yields of the treatments are shown in an average of each 5 years, period from the beginning.

After 41 years, the soil samples were taken from each plot and chemically analyzed. Some of the soil properties of the surface soils are shown in table 12.

D. 3. — *Discussion and Summary*

1. Average rice yields responded to each treatment are in the order from high to low ; as NPK, OK, OP, Single N, Single P and control. In the cold years, the

yield order of the treatment was changed randomely and the yields of OP and single N plots were extremely dropped.

2. It seemed that the yield of the ON plot tends to decrease year by year and that of the control followed to the similar tendency.

TABLE 11

Rice yields in the average of each 5 years' period

	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-41
Control	2,394	1,528	2,424	1,449	2,219	2,009	2,170	2,546
O N (P + K)	2,212	1,985	2,301	2,347	2,207	2,138	2,167	2,911
O P (N + K)	1,892	2,419	3,424	2,427	3,098	2,964	3,075	3,161
O K (N + P)	3,284	2,803	3,782	2,865	3,278	3,325	3,970	4,173
N + P + K..	3,572	3,153	3,911	2,925	3,469	3,624	4,280	4,470
Single N	2,793	1,966	3,090	2,383	2,868	2,802	3,301	3,781
SingleP	2,690	2,363	3,221	2,238	2,074	1,925	1,947	2,887
	2,149	2,458	2,903	3,454	3,695	2,896	2,426	

Remarks: 1926, 32, 33, 35, 36, 42, 46, 55, 57, 65, 66 and 67 years were the year of cold damages, respectively.
Average yields of the cold years are as follows (kg/ha) ; control, 1,207 ; ON, 1,341 ; OP, 805 ; OK, 1,699 ;
NPK, 1,341 ; Single N, 715 ; Single P, 1,475.

TABLE 12

Changes of soil properties after 41 years experiment

	pH 1 : 2.5	Total carbon (%)	Total nitrogen (%)	Available P_2O_5 mg/100 g	CEC me/100 g	Exchangeable me/100 g		Mineralization NH_4 mg/100 g
						CaO	MgO	
Control	5.7	2.3	022	3.6	24.8	11.2	2.7	15.3
ON	6.0	2.2	0.21	13.3	24.3	12.8	2.5	12.3
OP	5.8	2.4	0.22	2.7	26.9	11.8	2.6	15.1
OK	5.6	2.3	0.21	9.2	24.9	10.6	1.7	14.9
N + P + K..	5.5	2.4	0.22	12.3	24.1	9.9	1.6	15.3

3. In the cold years, both plots, OP and single N, were seriously affected by the cold temperature. Therefore, it can be recommended that nitrogen and phosphorus should be applied in the area where the cold damages on rice occurred sometimes.

4. Phosphorus content of the OP plot decreased heavily, but there are not much differences observed among other soils on other chemical properties.

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

RÉSULTATS D'ESSAIS DE FERTILISATION DE LONGUE DURÉE SUR RIZ AU JAPON

Dans ce mémoire sont présentés les quatre essais de fertilisation de longue durée sur riz au Japon retenus, à savoir : KONOSU (50 ans), AOMORI (32 ans), AICHI (42 ans) et HOKKAIDO (41 ans). Bien que ces expériences aient été quelque peu différentes en détail, elles avaient toutes pour but d'examiner les effets des engrais minéraux et organiques sur le riz et particulièrement ceux des éléments fertilisants.

Le résumé général des résultats obtenus à partir de ces quatre expériences fut le suivant :

1. L'effet des engrais minéraux sur riz fut reconnu très voisin de celui des engrais organiques, sauf dans le cas de sols particuliers présentant des déficiences en P ou K.

2. Parmi les éléments fertilisants, l'azote fut le facteur limitant le plus important ; venaient ensuite P et K.

3. Les rendements du riz ont été légèrement augmentés par l'application continue de compost bien que son effet n'ait pas été apparent dès le début.

4. Le riz obtenu sur les parcelles compostées, phosphatées et azotées a montré une forte résistance aux dégâts provoqués par le froid qui toucha, certaines années, les régions des essais. Pour cette raison, dans ces régions, il est recommandé d'appliquer P et K, ainsi que des composts, en quantités suffisantes.

5. Les caractéristiques chimiques du sol et particulièrement les teneurs en carbone et en azote et la minéralisation de l'azote ont été légèrement modifiées par l'application d'engrais organiques.

6. Sous la pression constante de l'urbanisation, l'eutrophication de l'eau d'irrigation s'est développée, ce qui a perturbé sérieusement les résultats expérimentaux. Pour cette raison, les expériences furent arrêtées ou déplacées vers des emplacements nouveaux.

ZUSAMMENFASSUNG

ERGEBNISSE VON LANGFRISTIGEN REISDÜNGUNGSVERSUCHEN IN JAPAN

In diesem Bericht werden die vier gewählten, in Japan durchgeführten, langfristigen Reisdüngungsversuche, doh die von KONOSU (50 jahre), AOMORI (32 jahre), AICHI (42 jahre) und HOKKAIDO (41 jahre) vorgestellt. Obwohl diese Versuche im einzelnen etwas abweichend gewesen worden sind, war ihrer gemeinsame Zweck, die Wirkungen der mineralischen und organischen Dünger und insbesondere die der Düngstoffe auf den Reis zu bestimmen.

Die gesamte Übersicht der im Laufe dieser vier Versuche erzielten Ergebnisse war folgendes :

1. Die Wirkung der mineralischen Dünger auf den Reis wurde als der von organischen Düngern sehr ähnlich anerkannt, ausser im Falle von besondere P oder K Mängel aüssernden Böden.

2. Unter den Düngstoffen war Stickstoff der wichtigste Begrenzungsfaktor, danach folgten P und K.

3. Die Reiserträge wurden durch die fortgehende Anwendung von Kompost ein wenig erhöht obgleich seine Wirkung nicht von Anfang an sichtbar worden ist.

4. Der auf den mit Kompost, Phosphat und Stickstoff versorgten Parzellen gewachsene Reis zeigte eine höhe Beständigkeit gegen die durch die Kälte verursachten Schäden, die in gewissen Jahren die Versuchsgebiete betreffen. Deswegen ist es empfehlenswert P und K-zufuhr sowie ausreichende Kompostgaben in diesen Gebieten anzuwenden.

5. Die chemischen Bodeneigenschaften und insbesondere der Gehalt an Kohlenstoff und Stickstoff und die Stickstoffmineralisierung sind durch die Anwendung organischer Dünger ein wenig geändert worden.

6. Durch den fortlaufenden Zwang der verstädterung wurde das Bewässerungswasser zunehmend reicher an Nährshoffgehalt, was die Versuchsergebnisse bedeutsam gestört hat. Deswegen wurden die Versuche unterbrochen oder an neuen Stellen gesetzt.

РЕЗЮМЕ

Результаты долгосрочных опытов по удобрению риса в Японии.

Г. МАТСУО, Ж. ХАЙАЗЕ, Г. ЙОКОИ, И. ОНИКУРА.

В данной работе представлены результаты 4-х долгосрочных опытов по удобрению риса в Японии, проведенных в Коиноису (50 лет), Аомори (32 года), Аиши (42 года) и Хоккаидо (41 год.) Несмотря на некоторую разницу в деталях, все опыты преследовали одну и ту-же цель : изучение влияния минеральных и органических удобрений, и в особенности главных питательных элементов, на рис.

Полученные в этих 4-х опытах результаты можно резюмировать следующим образом :

1. Необходимо признать что влияние минеральных удобрений на рис было приблизительно того-же порядка, что и влияние удобрений органических, за исключением частных случаев почв, в которых наблюдалась недостаточность фосфора, или калия.
2. Из главных питательных элементов азот являлся наиважнейшим ограничивающим фактором; за ним следовали фосфор и калий.
3. Урожайность риса немного увеличивалась при постоянном применении компоста, несмотря на то, что действие этого последнего проявлялось не сразу.
4. Рис полученный на делянках со внесением компоста, фосфора и азота проявлял сильную устойчивость к холоду, затрагивавшему в некоторые годы районы в которых проводились опыты. И поэтому и рекомендуется, в этих районах, вносить в почву достаточные количества как фосфора, так и калия и компоста.
5. Химические характерности почвы, в особенности содержание в ней углерода и азота, также как и уровень минерализации азота, немного изменились под влиянием долгосрочного внесения органического удобрения.
6. Постоянное влияние урбанизации вызвало слишком сильную эвтрофикацию оросительных вод, что, в конце концов, сильно изменило полученные экспериментальные результаты. Опыты были поэтому или остановлены, или перенесены в новые места.

REFERENCES

1954. Effect of phosphorus fertilizer for rice. *Hiroshima Agri. Exp. Stat.*, **2**, 1-75.

NAKANISHI S. *et al.*, 1970. Element experiment of rice for 40 years. *Bulletin Aichi Agr. Exp. Stat.* **24**, 46-58.

1970. Changes of rice yield on non-fertilizer treatment, Research data for environment, conservation. *Soil Lab. Agr. Exp. Stat.*, 334-337.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 969-981.

INTERVENTION

COMPORTEMENT VARIÉTAL ET CONDUITE DU BLÉ TENDRE EN MONOCULTURE DE LONGUE DURÉE

Ph. HUET et J. BOYELDIEU

Chaire d'Agronomie, Institut national agronomique, Paris-Grignon, 78850 Thiverval Grignon

RÉSUMÉ

Sur une sole continuellement cultivée en blé depuis 1900, plusieurs expérimentations ont été conduites afin d'améliorer les rendements, qui sans précautions particulières, sont inférieurs d'environ 20 p. 100 à ceux d'un blé en rotation.

Dans cet essai, la réponse du rendement à la fumure azotée plafonne à partir de 100 unités/ha, dose faible eu égard aux potentialités de la variété cultivée (*Champlein*) et à la succession de culture.

L'application de traitements fongicides à action polyvalente, sur la végétation, permet de contrôler les maladies cryptogamiques, et principalement le piétin-verse, procurant ainsi une augmentation sensible du rendement.

INTRODUCTION

La situation limite que constitue la monoculture a de tout temps soulevé la curiosité des agronomes. La répétition systématique d'une même culture sur une parcelle est considérée comme anormale, surtout en Europe, depuis la généralisation des rotations culturales; pourtant il existe quelques régions du monde où elle est traditionnellement pratiquée.

Il est indéniable, et de nombreuses expériences en apportent la preuve, que la monoculture du blé, en particulier, conduit à une réduction notable du rendement en grain. Cette diminution de la productivité qui se manifeste dès les premières années de culture continue, constitue l'aspect le plus connu de la question. Par contre, les informations sont beaucoup plus rares sur les conséquences induites à terme, par ce système de culture, sur les diverses propriétés du milieu.

A Grignon, BERTHAULT implanta dès 1900, sur une parcelle d'environ 9 ares, une monoculture de blé tendre qui a été maintenue jusqu'à nos jours. L'absence de relevés suivis de la production ne permet pas de retracer l'évolution des rendements, cette monoculture avait à l'origine un caractère essentiellement démonstratif.

Le fait d'avoir assuré la pérennité de cette succession, surtout avec les moyens techniques limités dont on disposait au début du siècle, est en soi remarquable, et pour illustrer les difficultés soulevées par une expérience de ce type, rappelons que DEHÉRAIN dut interrompre après la huitième année, une monoculture d'avoine, implantée à Grignon en 1875, à la suite d'une infestation d'*Agropyrum repens*.

I. — CARACTÉRISTIQUES DU MILIEU

Le climat est représentatif de celui du Bassin parisien.

- La pluviométrie moyenne annuelle est de 640 mm, avec 220 mm répartis sur la période hivernale (novembre à février inclus). La période la plus sèche s'étend de février à avril, elle occasionne un déficit du bilan hydrique de la culture du blé d'hiver, d'environ 100 mm, qui n'est corrigé que vers la fin du mois de juin. La réserve en eau du sol compense en général ce déficit.
- La température moyenne annuelle est de 10,5°, avec une amplitude de variation mensuelle de 16°C. Les risques de gel du blé sont faibles, les derniers dégâts remontent à l'hiver 1962-1963.

Le sol. La parcelle cultivée continuellement en blé est située à la rupture de pente au fond du Val-de-Gally, elle présente une légère déclivité.

Il s'agit d'un sol colluvial bien pourvu en phosphore assimilable et en potassium échangeable, ayant les caractéristiques suivantes :

	p. 100 de terre fine
Argile	24-28
Limon fin	17-20
Limon grossier	22-23
Sable fin	22-25
Sable grossier	4-6
Calcaire	7
Matière organique (C/N = 9,8)	2,9
pH H_2O	7,9
pH KCl	7,0

II. — ORIENTATION DES RECHERCHES

1. — *Organisation*

Cette sole continuellement emblavée en blé tendre n'a pas été à l'origine incluse ou couplée avec d'autres soles normalement assolées ; elle constituait un essai de référence destiné à mettre au point les techniques culturales les mieux adaptées à la monoculture.

Les diverses études dont elle a constitué le support ont nécessité son découpage en parcelles, ou son association avec des dispositifs expérimentaux voisins (en dépit d'une légère hétérogénéité du sol).

2. — *Les différents travaux*

L'étude des principaux problèmes provoqués par la culture continue du blé a été abordée sur ce support expérimental :

— l'appréciation de l'amplitude du déclin du rendement consécutif à la monoculture, et la possibilité de restaurer le niveau de rendement par des coupures (betteraves sucrières, jachère) (PÉQUIGNOT et RÉCAMIER, 1961 et 1965) ;

— l'étude de la valorisation de la fumure azotée minérale entamée par ces auteurs et poursuivie régulièrement depuis 1972 (HUET, 1973). Elle est destinée à déterminer la dose optimum de l'apport à effectuer en monoculture de longue durée, en tenant compte de diverses caractéristiques culturales (variété, protection sanitaire). Trois doses sont apportées : 100-150 et 200 kg d'azote par hectare, fractionnées moitié à la fin du tallage, moitié en cours de montaison. Depuis 1974 un témoin sans azote a été ménagé dans la sole.

La réaction du matériel végétal dans cette situation culturale particulière a été testée :

- en 1970-1971 par la comparaison de 3 variétés (3 blocs, parcelles de 25 m²), relative à un précédent « pomme de terre » ;
- en 1971-1972 par la comparaison de 9 variétés (3 blocs, micro-parcelles de 2,4 m²), relative à un précédent « pomme de terre » ;
- lors de ces dernières années par introduction de deux variétés de blé d'hiver dans l'essai de fumure azotée.

Depuis 1974, les variétés retenues sont *Cappelle* et *Champlein* en raison de leur différence de sensibilité au piétin-verse (*Cercosporella herpotrichoides*).

La protection du blé en monoculture.

- En 1968 et 1969, FOURBET, avec la collaboration de BOURDIN, mit en place des essais de désinfection du sol, qui furent suivis par les spécialistes de l'.I.N.R.A. (Mme SIMON-SYLVESTRE, CASSINI). Dans les parcelles de 4,5 m² (5 blocs) l'effet de diverses matières actives (chloropicrine, Métam-Sodium, D.D.) a été étudié par rapport à des témoins recevant deux doses d'azote. Les arrière-actions de ces traitements ont pu être comparées lors des années suivantes.
- Depuis 1972, il est possible d'estimer l'importance des dégâts dus aux attaques de certains champignons pathogènes grâce à la comparaison entre des parcelles recevant un double traitement avec un fongicide systémique (méthylthiophanate 750 g/ha + Manèbe 1,5 kg/ha, appliqué à la fin du tallage et à la fin de la montaison) et des parcelles témoin, non traitées (HUET, 1973).

Ces différentes études qui ont dû être échelonnées dans le temps, ou limitées à la combinaison de quelques facteurs, permettent néanmoins de cerner un certain nombre de problèmes relatifs à la culture continue du blé. Parmi ces problèmes on peut distinguer :

— les effets directs observables sur la culture, et qui, comme nous le verrons ultérieurement, ne s'accentuent pas au fur et à mesure que l'on prolonge l'expérience ;

— et les modifications progressives du milieu cultivé, sous l'effet de la répétition systématique de la culture d'une seule espèce et, évidemment des interventions culturales associées. Ces changements induits au sein de l'agro-écosystème, dont l'incidence sur le comportement de la culture est parfois mal connue, ne doivent pas être négligés, puisqu'à terme ils sont susceptibles de constituer des facteurs limitants de ce système de culture.

C'est pourquoi, avant de commenter les résultats obtenus dans la monoculture de blé, nous présenterons quelques observations relatives à certains aspects importants de ce système de culture :

— l'entretien humique du sol,
— l'évolution de la mycoflore du sol,
— la sélection d'une flore adventice.

III. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. — *État de certaines caractéristiques du milieu sous monoculture de blé*

1° *Teneurs en carbone total et en azote total du sol.*

L'absence de point zéro en début d'expérience, et d'analyse intermédiaire, ne permet pas au travers de ces critères de retracer l'évolution du taux de matière organique sous cette monoculture de blé. L'exportation systématique des pailles à la suite de la récolte du grain, en déséquilibrant le bilan humique, était susceptible d'entraîner une réduction du taux de matière organique du sol.

L'analyse d'échantillons de terre prélevés en 1974, sous cette monoculture de longue durée, permet d'apprécier le niveau du stock de matière organique :

Carbone total p. 1000.....	17,2
Azote total p. 1000.....	1,76
Rapport C/N	9,4

Compte tenu des teneurs en argile et en calcaire du sol, la matière organique du sol, qui d'après le rapport C/N subit une évolution normale, est encore présente, soixante-quatorze ans après le début de l'expérience, en quantité satisfaisante.

Ceci tend à montrer qu'en monoculture de blé et sans enfouissement des pailles, l'entretien humique ne constitue pas dans ce type de sol une condition primordiale du maintien de la fertilité.

Pour expliquer ce résultat, mais aussi pour étudier dans quelle mesure l'incorporation systématique des pailles peut modifier le comportement du blé en culture continue, un essai complémentaire a été récemment implanté.

2° *Composition de la mycoflore du sol.*

Supposant que la culture continue d'une même espèce végétale sur un même sol, pouvait entraîner, de par l'effet rhizosphère et par l'enfouissement régulier de débris végétaux de nature identique, la sélection d'une « microflore associée à la

culture de la plante », CASSINI et ses collaborateurs ont procédé en 1963 à l'inventaire de la mycoflore du sol, sous monoculture de blé établie depuis 1900, et dans des sous-parcelles portant une coupure par des betteraves sucrières. L'inventaire obtenu par la méthode des dilutions ne permit pas de déceler une modification de la mycoflore consécutive à la rupture de la monoculture. Par ailleurs, l'absence d'une culture de blé normalement assolée, à proximité interdisait de vérifier l'hypothèse d'une sélection de la mycoflore. Il faut toutefois remarquer que cette étude, portant sur les champignons du sol, n'incluait pas l'ensemble des espèces pathogènes, puisque certaines d'entre elles survivent dans le sol, sur des débris végétaux, à l'état saprophytique.

3° *État de la flore adventice.*

Dans cette monoculture de blé de longue durée, la compétition exercée par les adventices et principalement par *Agropyrum repens* a constitué l'un des facteurs limitants du rendement de la céréale (RÉCAMIER *et al.*, 1974). Cependant, l'infestation par cette adventice, contrôlée par des façons culturales pendant l'automne n'a jamais justifié l'abandon de la monoculture. Depuis six ans, les traitements à l'aminotriazole ont permis, en cas de nécessité, de réduire l'infestation.

Sans que cela ait une incidence sensible sur le rendement de la céréale, la flore adventice dans la monoculture de blé présente une composition caractéristique, sensiblement différente de celles des soles voisines. L'application régulière d'un programme de désherbage incluant des colorants nitrés et des phythormones (24 D ou M.C.P.A.), pendant plus d'une dizaine d'années, a favorisé de façon sélective certaines mauvaises herbes, telles que : *Galium aparine, Veronica hederaefolia, Polygonum aviculare, Viola tricolor* et *Cirsium arvense* pour les dicotylédones, et, outre *A. Repens, Alopecurus agrestis* et *Avena fatua* pour les monocotylédones.

L'application d'un traitement à base de Chlortoluron + Mecoprop en 1973 a permis d'enrayer l'extension d'*A. fatua* dans la monoculture, tandis qu'en 1974 la plupart des dicotylédones précédemment signalées étaient contrôlées par l'association Dinoterbe + Mécoprop.

B. — *Comportement du blé tendre en monoculture*

1° *Niveau de production du blé en monoculture de longue durée.*

Vers 1950, les rendements en grain dans la monoculture de blé fluctuaient aux environs de 25 à 30 quintaux par hectare. PÉQUIGNOT et RÉCAMIER (1961 et 1965) montrèrent qu'une année de coupure, par jachère ou par culture de betterave, était suffisante pour rétablir le rendement du blé suivant, à un niveau normal (48-49 q/ha pour la variété *Cappelle*).

Si l'on considère les résultats moyens obtenus dans cette sole lors des cinq dernières années, et ceux correspondant à la même variété *Champlein* avec une dose d'engrais azoté comparable, voisine de l'optimum (120-150 unités d'azote/ha), mais succédant à un maïs-grain ou à une betterave fourragère, on peut grossièrement estimer à 20 p. 100 la réduction de rendement imputable à l'effet monoculture (tabl. 1).

TABLEAU I

Parallèle entre les rendements annuels du blé d'hiver, en monoculture de longue durée et ceux d'un blé assolé

Succession culturale	1971	1972	1973	1974	1975	Moyenne
Monoculture depuis 1900	42,5	54,4	37,1	47,9	37,5	43,9
Blé en alternance avec maïs ou betterave (moyenne)	47,8	65,7	60,0	61,0	41,7	55,2

Bien que les conditions expérimentales ne soient pas rigoureusement identiques, l'ordre de grandeur de la diminution de rendement due à la culture continue est en accord avec les résultats d'un essai plus récent : sur un dispositif présentant chaque année les six premiers blés succédant à une betterave, on a pu mettre en évidence que le rendement, dès les quatrième ou cinquième blés consécutifs se stabilise à un niveau inférieur d'environ 18 p. 100 à celui du blé de betterave (HUET, 1973). La concordance entre ces résultats montre donc que la réduction de rendement, dans ces conditions, est limitée aux premières années de culture continue. Le fait de prolonger la monoculture ne provoque pas la régression de la production : la culture répétée du blé ne semble pas induire d'effet cumulatif correspondant à un abaissement progressif de la fertilité du sol.

Par contre, il n'est pas possible de conclure sur la régularité de la production, puisque nous ne disposons pas des termes de comparaison, entre les rendements du blé continu et d'un blé en rotation, sur une prériode suffisante. En plus du niveau de production sensiblement inférieur en monoculture, on peut craindre une plus grande variabilité des rendements. Les facteurs limitants comme les maladies parasitaires, favorisées par la répétition d'une même plante-hôte, sont conditionnées par les caractères climatiques de l'année et se manifestent de façon irrégulière, les résultats obtenus en 1973 en sont l'illustration (cf. tabl. 1).

2° *Comportement variétal du blé tendre en monoculture.*

En 1970-1971, trois variétés ont été mises en comparaison sur la monoculture de blé datant de 1900 et sur une sole voisine, à la suite d'une monoculture de pomme de terre. Il s'agissait de rechercher des différences de comportement variétal, principalement entre une variété d'hiver et de printemps, afin, le cas échéant, de mettre en évidence des facteurs limitants induits par la monoculture.

De plus, une variété alternative (*Ch. Péguy*) devait permettre d'isoler l'influence de la date de semis.

Les résultats (tabl. 2) montrent que, pour une même fumure azotée (100 unités/ha), les variétés ne réagissent pas de façon différente dans les deux soles (interaction non significative).

Par contre, une tendance se manifeste entre les deux époques de semis pour la variétés *Ch. Péguy*, dans le sens d'une moindre « sensibilité » à la monoculture dans le cas du semis de printemps.

TABLEAU 2

Comportement de quelques variétés en monoculture-rendements en grain à 15 p. 100 d'humidité (q/ha)

Succession	Variété				Moyenne
	Champlein (hiver)	*Ch. Péguy* semis d'hiver	*Ch. Péguy* semis de printemps	*Atys* (printemps)	
Blé en monoculture	42,5	36,2	31,0	28,1	34,4
Blé après pomme de terre.	57,9	51,2	38,5	39,9	46,9
Moyenne	50,2	43,7	34,7	34,0	

p.p.d.s. TUKEY entre variétés (5 p. 100) : 7,4 q/ha,
(1 p. 100) : 9,6 q/ha.

Une comparaison réalisée dans les mêmes conditions, en 1971-1972, et portant sur huit variétés cultivées en micro-parcelles, montre que, si le classement de ces cultivars, d'après leur rendement, n'est pas sensiblement modifié en situation de monoculture (par rapport au précédent pomme de terre), leur réaction, d'après la structure du rendement, est sensiblement différente (fig. 1).

La diminution de rendement de *Capitole* et *Joss*, en monoculture, est due à un affaiblissement modéré du peuplement-épi, suivi d'une réduction importante de la productivité de l'épi (surtout imputable à la fertilité de l'épi), ces deux variétés se distinguent de l'ensemble des autres, à l'exception de *Cappelle* qui réagit peu dans cette expérience. Dans le cas de *Champlein, Heima, Péguy* et *Atys*, la forte réduction du peuplement-épi est à l'origine de la baisse de rendement en monoculture, en dépit d'une légère compensation par la productivité de l'épi.

Ces résultats montrent que, selon la variété cultivée, les différences de rendement ne sont pas induites au même stade de développement, par des causes de variation pouvant être multiples. Par ailleurs, il apparaît nécessaire de prendre en considération le comportement variétal pour adapter la conduite de la culture en situation de monoculture.

3° *Fertilisation azotée en monoculture de blé.*

PÉQUIGNOT et RÉCAMIER (1961 et 1965) avaient observé qu'en monoculture de blé de longue durée, la fumure azotée (entre 50 et 120 unités/ha) ne permettait pas, dans les conditions de l'essai, d'obtenir un accroissement sensible du rendement en grain du blé. Depuis 1972, ces travaux ont été repris afin de rechercher l'origine de ce phénomène, et les résultats obtenus à ce jour sur la variété *Champlein*, montrent que le maintien d'un peuplement en pieds suffisant, et par là même, l'obtention d'un

peuplement-épi correct, est l'une des conditions premières pour limiter la chute du rendement en monoculture.

Dans ce but, la densité de semis a été augmentée de 250 à 300 grains/m², et par ailleurs, la fertilisation azotée a été intensifiée. En effet, l'apport d'azote effectué au tallage permet de réduire sensiblement la mortalité des pieds qui est importante à cette époque, ceci est manifeste au niveau du peuplement-épi, car le tallage-épi reste limité par les attaques parasitaires.

Au cours des trois dernières campagnes, le rendement de la variété *Champlein* n'a pas été significativement amélioré par des doses d'azote supplémentaires, allant jusqu'à un total de 200 unités par hectare. Par contre, les apports élevés d'azote n'ont pas provoqué la verse du blé.

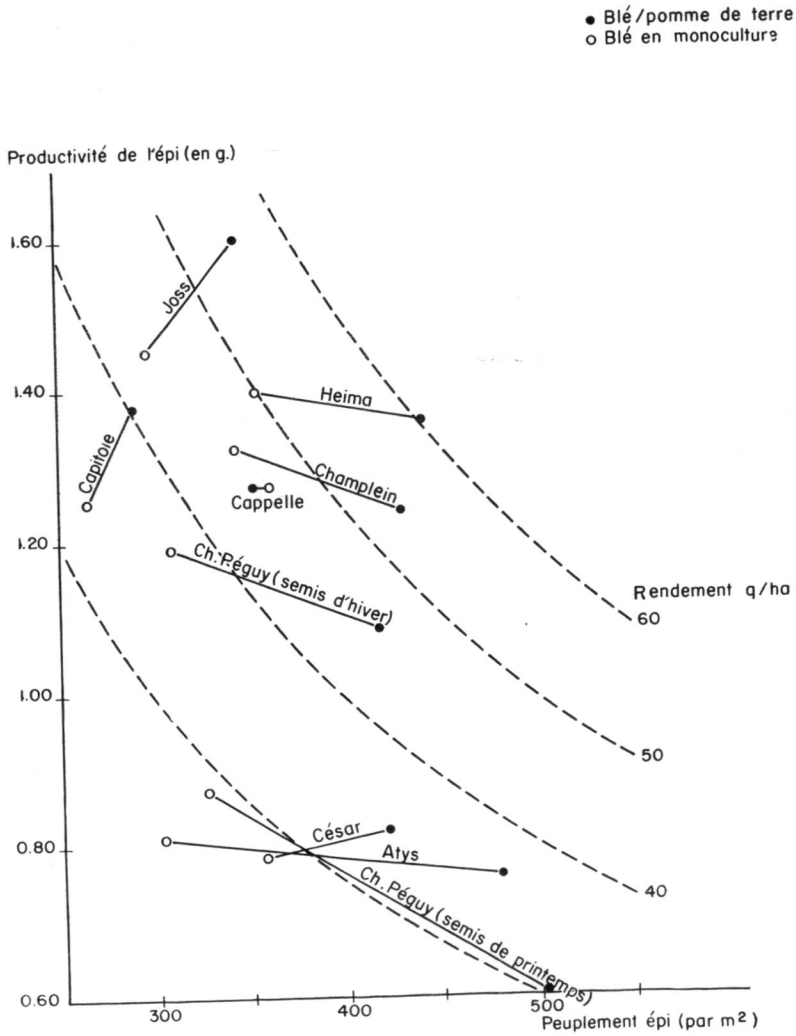


FIG. 1. — *Comportement de huit variétés de blé en monoculture, et succédant au précédent pomme de terre*

Néanmoins, les résultats moyens (tabl. 3) montrent une légère influence du niveau de fertilisation azotée sur le peuplement en pieds à la récolte et sur le peuplement-épi, sans conséquence sur le rendement, en raison des compensations par les composantes de l'épi.

TABLEAU 3

Influence de la dose d'azote sur le blé en monoculture
(résultats moyens sur trois ans, 1973-1974-1975 ; variété *Champlein*)

Dose d'azote (N kg/ha) (1/2 tallage + 1/2 montaison)	100	150	200	Moyenne
Nombre de pieds/m²	159	164	169	164
Nombre d'épis/pieds	2,11	2,06	2,06	2,08
Nombre d'épis/m²	348	353	370	357
Fertilité de l'épi	24,6	26,8	25,5	25,6
Poids de 1 000 grains (g)	43,2	41,8	40,2	41,7
Productivité de l'épi (g)	1,07	1,13	1,03	1,08
Rendement (q/ha)	40,0	40,8	40,4	40,4

La comparaison avec les témoins sans azote, introduits depuis 1974, montre que la fertilisation azotée, en l'absence de traitement fongicide, est efficace entre 0 et 100 kg/ha (+ 22 quintaux en 1974, et + 13 quintaux en 1975). Le fait que les doses supplémentaires d'azote ne soient pas valorisées et qu'une composante du rendement, telle que le tallage-épi, ne réagisse pas positivement à ces apports montre que l'état sanitaire de la culture constitue un facteur limitant du rendement. Des essais de protection sanitaire ont donc été entrepris, plus pour estimer les pertes dues aux maladies, que pour obtenir un contrôle économique des attaques.

4° *Protection sanitaire du blé en monoculture.*

Désinfection du sol.

Les essais réalisés en 1968 et 1969 avec différentes matières actives incorporées au sol durant les intercultures ont permis d'augmenter de façon significative le rendement du blé par rapport à des parcelles témoin recevant des doses croissantes d'azote (FOURBET, résultats non publiés). L'effet favorable de la désinfection du sol s'est manifesté de façon fugace. Sur le deuxième blé succédant au traitement, dans le cas de la chloropicrine, il était pratiquement négligeable.

Ces expériences ont par ailleurs permis de préciser l'influence de la chloropicrine sur certains processus du cycle de l'azote dans le sol : minéralisation, ammonification, nitrification (Mme SIMON-SYLVESTRE, 1970).

Traitements fongicides en végétation.

Grâce aux traitements fongicides en végétation, il est possible par comparaison avec des parcelles non traitées, d'apprécier les pertes de rendements provoquées par les parasites cryptogamiques (HUET, 1973 et 1975). Il est apparu que l'association d'un fongicide systémique et d'un dithiocarbamate contrôle : le piétin verse et la

fusariose du pied, en traitement de fin de tallage, et dans une moindre mesure, la fusariose sur épi, la septoriose, les rouilles et l'oïdium, par traitement avant l'épiaison.

Depuis 1972, des parcelles de la monoculture établie en 1900 reçoivent le double traitement fongicide (fin de tallage et stade de gonflement) ; leur rendement en grain est toujours significativement supérieur à celui des parcelles-témoin (tabl. 4).

TABLEAU 4

Effet du double traitement fongicide sur le blé en monoculture
(variété *Champlein*, dose d'azote : 150 kg/ha)

Année	1972		1973		1974		1975		Moyenne	
Traitement (*)	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
Nombre de pieds/m²	230	226	137	157	181	239	182	198	182	205
Nombre d'épis/pied	2,1	2,4	2,4	2,8	1,8	1,5	2,0	2,2	2,1	2,2
Nombre d'épis/m²	477	540	339	448	326	358	388	437	382	446
Fertilité de l'épi	25,8	24,7	26,9	22,7	28,8	27,2	25,4	24,6	26,7	24,8
Poids 1 000 grains (g)	43,3	44,2	38,4	41,5	49,5	51,3	38,6	36,9	42,4	43,5
Productivité de l'épi (g)	1,12	1,09	1,03	0,94	1,43	1,39	0,98	0,91	1,14	1,08
Rendement en grain (q/ha)	54,4	62,2	37,1	45,4	45,5	53,0	36,4	40,6	43,3	50,3

(*) T : témoin non traité. F : traitement fongicide.

D'après nos déterminations, les dégâts parasitaires qui peuvent être chiffrés par l'accroissement du rendement en grain, sont principalement dus au *Cercosporella herpotrichoides*. Leur incidence est caractérisée par une variation annuelle importance, surtout manifeste en 1973, année pour laquelle les rendements en monoculture étaient anormalement bas par rapport à ceux du blé en rotation :

Année	1972	1973	1974	1975
Accroissement relatif du rendement à la suite des traitements (%)	14	22	16	11

L'étude des composantes du rendement (fig. 2) met en évidence la remarquable régularité du mode d'action du fongicide. Le premier traitement en fin de tallage joue probablement, pour *Champlein*, un rôle prépondérant en assurant un peuplement épi plus élevé (composante limitante de *Champlein* en monoculture). Il réduit la mortalité des pieds en cours de végétation, et tend à augmenter le tallage, en dépit du stade d'application (tabl. 4).

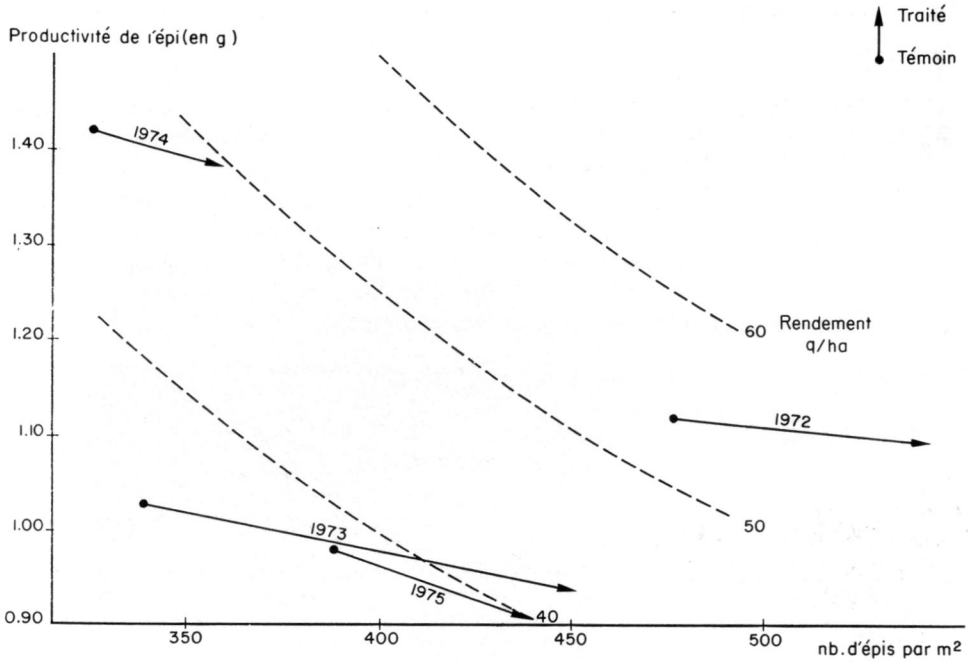


FIG. 2. — *Composantes du rendement du blé en monoculture* (*variété* Champlein) *et traitement fongicide*

Si la fertilité de l'épi est en moyenne significativement réduite à la suite du traitement, ceci résulte d'une compensation consécutive à l'accroissement du peuplement-épi. Par contre, la formation des grains peut être sensiblement améliorée par le second traitement (1973 et 1974), lorsque les dégâts parasitaires sur le feuillage et les épis sont notables.

Étant donné la concordance qui apparaît, au niveau de la structure du rendement, entre l'effet du traitement fongicide et celui d'un bon précédent (pomme de terre, cf. fig. 1), on peut penser que les dégâts causés par les parasites cryptogamiques constituent dans cette monoculture l'un des principaux facteurs limitants du rendement.

CONCLUSIONS

A cette échelle et dans nos conditions, la monoculture du blé peut être maintenue à long terme. La diminution de rendement qui l'affecte néanmoins, estimée à 20 p. 100 par rapport à un blé assolé, est susceptible d'être réduite par le choix d'une variété moins sensible au principal agent pathogène favorisé par la répétition de la culture (*C. herpotrichoides*).

Il apparaît que la valorisation des apports supplémentaires d'azote est conditionnée par la protection sanitaire de la culture. Le double traitement fongicide procure une augmentation de rendement de l'ordre de 16 p. 100, ce qui réduit sensiblement l'écart par rapport à un blé alternant avec d'autres espèces, même en consi-

dérant que les traitements fongicides peuvent avoir une action positive sur le rendement de ceux-ci.

L'étude reste évidemment incomplète, puisqu'elle n'inclut pas l'estimation des dégâts dus à d'autres parasites tels que les nématodes, mais, d'après les observations sur la végétation, l'incidence des nématodes phytophages ne semble pas constituer la cause principale de la réduction de rendement.

En raison de l'exiguïté de la sole les interactions entre les différents facteurs, fumure azotée et traitements fongicides n'ont pas pu être étudiées ; une série d'expériences plus récentes est destinée à fournir des informations complémentaires sur ces problèmes, ainsi que sur les possibilités d'aménagement du système de culture (culture dérobée d'engrais vert, successions variétales).

Reçu pour publication en septembre 1976.

SUMMARY

VARIETAL BEHAVIOUR AND LONG-TERM MONOCULTURE OF WHEAT

On a soil continuously put to wheat since 1900 several experiments were carried out so as to improve the yields which without special cares are 20 p. 100 lower than those obtained in a rotation.

In these experiments, the yield response to nitrogen supply reaches a maximum from 100 units/ha onwards, a low result as compared with the potentialities of the cultivated variety (Champlein) and with crop rotation.

The treatment of plant with polyvalent fungicides allows to check cryptogamic diseases and especially foot rot, thus inducing a sensible yield increase.

ZUSAMMENFASSUNG

SORTENVERHALTEN UND LANGFRISTIGE MONOKULTUR VOM WEICHEN WEIZEN

Mehrere Versuche wurden auf einen seit 1900 fortdauernd mit Weizen bepflanzten Boden durchgeführt, um die Erträge zu verbessern, die ohne spezielle Vorsichtsmassnahmen 20 p. 100 niedriger als die eines in Wechselkultur gewachsenen Weizens sind.

In diesem Versuch stagniert die Wirkung der Stickstoffdüngung auf den Ertrag von 100 Einheiten/ha, einen niedrigen Ertrag in Bezug auf die Potentialitäten der kultivierten Sorte (Champlein) und die Wechselkultur.

Die Behandlung der Vegetation mit mehrwertigen Fungiziden erlaubt die Pilzkrankhieten und insbesondere die Fusskrankheit zu beherrschen- und bewirkt eine deutliche Ertragserhöhung.

РЕЗЮМЕ

Сортовое поведение мягкой пшеницы при ее долгосрочной монокультуре.

Ф. ХЮЕТ, Ж. БУАЕЛЬДИЕ.

На делянке, на которой постоянно с 1900-го года проводилась культура пшеницы, было поставлено несколько опытов по улучшению ее урожайности, падавшей, при отсутствии определенных мер предосторожности, на 20 % ниже урожайности пшеницы в севообороте.

В данном опыте максимальное увеличение урожайности достигалось при внесении дозы в 100 единиц азота/га, дозы слабой, если принять во внимание потенциальности культивируемого сорта и бессменность культуры.

Применение поливалентных противогрибковых обработок позволяло контроль над болезнями, главным образом гнилью междоузлий, и увеличивало чувствительным образом урожайность.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CASSINI Renée, CASSINI R., MASSENOT M., 1966. Mycoflore d'un sol cultivé en blé depuis 1900 à l'E.N.S.A. de Grignon. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, **12**, 355-365.

HUET Ph., 1973. Quelques résultats sur les essais de monoculture de blé. *C. R. Acad. agric.*, 541-550.

HUET Ph., 1975. Considérations sur la culture du blé sur blé. *Agriculture*, **384**, 77-84.

PÉQUIGNOT R., RÉCAMIER A., 1961. Quelques résultats à propos des assolements céréaliers. *C. R. Acad. agric.*, 337-343.

PÉQUIGNOT R., RÉCAMIER A., 1965. Utilité de rompre un assolement céréalier par d'autres cultures. *C. R. Acad. agric.*, 389-399.

RÉCAMIER A., FOURBET J. F., HUET Ph., 1974. *La Section du S.E.I. de Grignon de 1964 à 1974.* Publication S.E.I.

SIMON-SYLVESTRE Ginette, 1970. *Désinfectation des sols par la chloropicrine.* C. R. Réunion I.N.R.A. Rennes.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 983-988.

INTERVENTION

VINGT-SIX ANNÉES DE CONTRÔLE ALIMENTAIRE D'UN VERGER DE POMMIERS

Ph. GAUTIER

Laboratoire de Recherches et Applications agronomiques de la Croix de Berny, Rhône-Poulenc, 92160 Antony

RÉSUMÉ

Un verger de pommiers, variété *Belle de Boskoop*, a été suivi pendant vingt-six ans pour différentes composantes du rendement et, plus particulièrement la fertilisation azotée.

On en déduit la dose d'azote la plus favorable, dans les conditions de l'essai, et on remarque certains aspects du métabolisme des éléments minéraux N, P, K, Ca, Mg dans le cas du pommier.

INTRODUCTION

Pendant toute la durée d'une expérience avec des doses croissantes d'engrais azoté, on a enregistré un certain nombre de données climatiques et effectué régulièrement l'analyse des feuilles, afin de connaître les variables les plus actives sur l'obtention du rendement.

Ce verger, planté en 1943, était situé en France, en Sologne, et a été suivi depuis la quatrième année après sa plantation jusqu'à son arrachage, en 1972, soit pendant vingt-six années, jusqu'à l'âge de trente ans.

En 1962, l'éventail des doses d'azote (de 0 à 200 unités N/ha) a été ouvert davantage, les doses étant : 0-50-100-150-200-250-300 unités N/ha (RICHARD, 1963).

En 1967, la synthèse des analyses foliaires réalisées jusque-là montrait, dans les parcelles Témoin, sans azote, une accumulation dans les feuilles de phosphore non métabolisé en corrélation négative avec le taux d'azote. Ce phénomène ne se produit pas dans les parcelles recevant des engrais azotés (GAUTIER, 1968).

A la fin de l'essai, on a traité l'ensemble des données par une série de méthodes

statistiques modernes : analyse factorielle en composantes principales, analyse discriminante, analyse canonique, pour voir quel a été l'effet principal sur l'obtention des rendements (BERTIER et BOUROCHE, 1975).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Il s'agit d'un verger, haute tige, planté à 10 m × 10 m en forme libre, variété *Belle de Boskoop*.

Pendant toute la durée de l'essai, on a appliqué un mulch de paille ou de roseaux et les herbes étaient fauchées plusieurs fois dans l'année au gyrobroyeur.

Le sol, en majorité sableux (avec seulement 5 à 6 p. 100 de limon fin et 2 à 3 p. 100 d'argile) a un pH voisin de 6, est pauvre en éléments nutritifs, et est établi sur un sous-sol plus argileux, à tendance hydromorphique.

La taille, après la formation des charpentières, a consisté en simples élagages.

La fumure PK Mg a été uniforme sur tout le verger, et variable par périodes, d'après les analyses de sol.

La charge moyenne par arbre, tous traitements, en excluant les cinq premières années, a été de 300 kg et a atteint au maximum 750 kg de fruits.

On a noté, chaque année : la date de floraison, l'insolation de mai à juillet et de août-septembre, les apports d'eau (pluie + irrigation) de janvier à avril, mai à juillet et août-septembre, l'accroissement des troncs, le poids de 100 feuilles, les teneurs de ces feuilles (prélevées fin juillet-début août, environ 130 jours après floraison) en N, P, K, Ca, Mg et le rendement de chaque arbre.

L'ensemble de ces données a été traité, pour les vingt-six années, par ordinateur, en analyse factorielle par composantes principales (GAUTIER et TESSIER, 1971) suivi d'une analyse discriminante et d'une analyse canonique.

RÉSULTATS

Influence du Mulch

Une première observation intéressante concerne la réaction du système radiculaire des arbres à l'application du mulch.

Au cours du temps, l'existence du mulch a entraîné, en surface, sur 5 à 10 cm de profondeur, l'existence d'une couche riche en matière organique vers laquelle on a pu vérifier que se dirigeaient un grand nombre de radicelles actives.

La paille, en cours de décomposition, protégeait la surface du sol de l'évaporation et cette zone restait le plus souvent fraîche entre deux apports d'eau (pluviométrie minimale : 409 mm en 1956 et maximale : 919 mm en 1960. Apports par irrigations de 30 mm pour combler les déficits).

D'autre part, cette circonstance permettait aux engrais, apportés en surface, de se trouver, très vite, dans la zone active du système radiculaire.

Influence de l'apport en azote

En excluant les cinq premières années et les années de gel, on arrive, pour les quatre principales doses, à une moyenne de rendement, sur dix-huit ans, de :

	kg/arbre
Témoin sans azote	228
Dose de base (80 kg N/an jusqu'en 1961, 100 kg N ensuite)	276
Dose forte (170 kg N/an jusqu'en 1961, 250 kg N ensuite)	375
Dose très forte (200 kg N/an jusqu'en 1961, 300 kg N ensuite)	409

a) *Analyse canonique.*

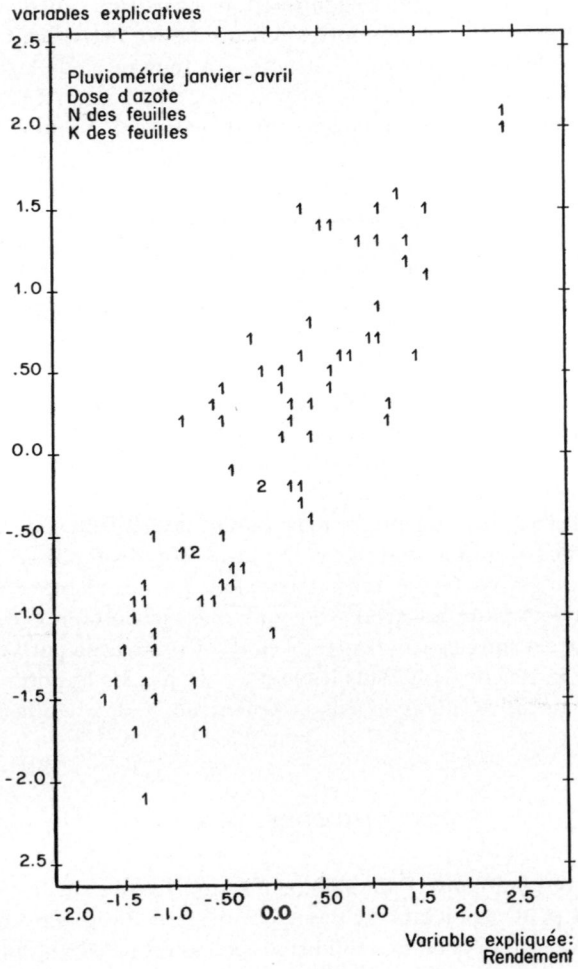
Cette analyse indique la hiérarchie d'action des variables dites explicatives sur les variables que l'on a cherché à expliquer : rendement, poids de 100 feuilles.

L'action de l'azote est indiquée comme venant tout de suite après la pluviométrie de janvier à avril dans l'influence sur le *rendement.*

Les autres variables qui ont joué sur celui-ci sont, par ordre décroissant d'influence :

— la quantité d'eau reçue en août-septembre,
— le taux d'azote des feuilles.

TABLEAU I



Il y a d'autre part, corrélation négative entre taux d'azote des feuilles et taux de P et K, plus particulièrement pour K.

La relation entre variables explicatives (dont la dose d'azote apportée constitue

la principale) et variables expliquées (dont le rendement est la principale) est représentée par l'analyse canonique dans le tableau 1.

On peut voir également, dans cette analyse, que le *poids de 100 feuilles* et le rendement de l'année, en poids de fruit, sont deux variables indépendantes.

Le poids de 100 feuilles est conditionné, par ordre décroissant d'influence : par le diamètre du tronc (corrélation négative), puis par l'insolation de mai à juillet (corrélation positive), et il y a corrélation négative entre le poids des feuilles et leur teneur en azote et en calcium (effet de dilution).

L'apport d'azote ne joue pas sur le poids de 100 feuilles.

b) *Analyse discriminante.*

Cette analyse, qui indique la signification statistique entre les groupes, nous montre que les doses fortes et très fortes d'azote ne se distinguent pas significativement entre elles, alors qu'elles sont distinctes du témoin et de la dose de base.

On peut donc conclure que la dose forte (170 kg/N an jusqu'à l'âge de dix-huit ans et 250 kg N/ha entre dix-neuf et vingt-neuf ans) permet d'approcher le rendement maximum.

Relations entre variables

Analyse factorielle en composantes principales.

Cette analyse rassemble, sous le nom de facteurs, les groupes indépendants de variables corrélées entre elles.

On y voit :

— que les taux de Ca et Mg dans les feuilles sont influencés négativement par les dates de floraison tardives (printemps froids) ;

— que le taux de K des feuilles est influencé négativement par les apports d'eau abondants, qui favorisent le rendement ;

— que la pluviométrie de printemps (janvier-avril) influence favorablement le poids de 100 feuilles, diminue les taux de N, Ca et Mg des feuilles, augmente le taux de P (corrélation négative avec le taux d'azote) et que ces phénomènes se produisent plus particulièrement pour les arbres qui ont une circonférence des troncs faible ;

— que la corrélation négative entre N et P est influencée par l'insolation de mai à juillet (favorise la teneur de N dans les feuilles) et par les apports d'eau à la même époque (qui, au contraire, défavorisent la teneur en N des feuilles).

DISCUSSION

L'influence prédominante d'une dose suffisante d'azote sur le rendement ne fait pas de doute. On peut cependant se poser la question du choix entre la dose forte et la dose très forte, qui dépend des conditions économiques du moment.

Cependant, quand on voit qu'en moyenne la dose supplémentaire (+ 30 N/an en début de végétation + 50 N/an après vingt ans) est payée par un supplément de récolte moyen de 34 kg/arbre (soit 3,4 t/ha), les chances pour que la dose très forte ne soit pas payante, une année, sont très faibles.

L'indépendance du rendement par rapport au poids de 100 feuilles mérite réflexion.

On peut imaginer, en effet, que plus les feuilles sont grandes, mieux est utilisée l'énergie solaire, plus il y a de rendement. En fait, il semble bien que c'est le facteur eau qui est prédominant pour le poids des fruits, et qui l'emporte, pour cela, sur l'assimilation chlorophylienne.

Plus difficile à interpréter est la relation négative entre circonférence du tronc et poids des feuilles. Il eut fallu mesurer la longueur des rameaux pour savoir quelle relation il y avait entre développement des rameaux et poids des feuilles.

La corrélation négative entre les taux de N et P des feuilles est particulièrement nette dans le cas de manque d'azote (GAUTIER, 1968). Nous avons observé dans des enquêtes sur vergers normalement fertilisés que celle-ci pouvait, au contraire, être positive.

CONCLUSION

Cet essai de fertilisation de longue durée a permis de mettre en évidence un certain nombre de relations entre les variables explicatives du rendement et celui-ci, particulièrement en ce qui concerne la fertilisation azotée.

On en tire des enseignements sur les conséquences métaboliques du manque d'azote, plus particulièrement en ce qui concerne la non-métabolisation du phosphore.

Enfin, il n'est pas inutile de remarquer l'importance de la pluviométrie de janvier à avril (période dans laquelle on n'irrigue généralement pas) sur l'obtention d'un qon rendement.

Reçu pour publication en mai 1976.

SUMMARY

TWENTY SIX YEARS OF NUTRITION SURVEY IN AN ORCHARD OF APPLE-TREES

An orchard composed of apple-trees belonging to the variety « Belle de Boskoop » was observed during twenty six years to study different yield factors and more specially the nitrogen fertilization.

The most favourable nitrogen supply under the relevant experimental conditions is determined and some aspects of the metabolism of the mineral nutrients N, P, K, Ca, Mg in apple-tree are noted.

ZUSAMMENFASSUNG

SECHS UND ZWANZIG JAHRE VON ERNÄHRUNGSÜBERWACHUNG IN EINEM APFELBAUMOBSTGARTEN

Ein mit Apfelbaümen der Sorte « Belle de Boskoop » bepflanzter Obstgarten ist während sechs und zwanzig Jahre für verschiedene Ertragsfaktoren und insbesondere für die Stickstoffdüngung untersucht worden.

Die günstigte Stickstoffgabe unter den Versuchsbedingungen wurde bestimmt und einige Seiten des Stoffwechsels der Mineralstoffe N, P, K, Ca, Mg im Falle des Apfelbaums sind betont.

РЕЗЮМЕ

26-ти летний контроль питания яблочного сада.

Ф. ГОТЬЕ.

В яблоневом саду (яблоки сорта Боскопская Красавица), в течении 26-ти лет следилось за различными составными урожая, и особенно за азотным питанием яблонь. Это позволило определить оптимальную дозу азота в условиях опыта, и отметить некоторые особенности метаболизма И, Р, К, Са и Mg, у яблони.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement M. François Robin, arboriculteur en Sologne, d'avoir mis pendant si longtemps, un de ses vergers à notre disposition ; M. Robert Bouyer de l'Écluse d'avoir assuré, pendant le même temps, les soins aux arbres et les prélèvements d'échantillon et M. Pierre Tessier de son aide précieuse dans les travaux mathématiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bertier P., Bouroche J. M., 1975. *Analyse des données multidimensionnelles* : pour l'analyse canonique, p. 149 et suiv. ; pour l'analyse discriminante, p. 163 et suiv.

Gautier Ph., 1968. Vingt ans de diagnostic foliaire dans un verger de pommiers, en Sologne. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 493 à 503.

Gautier Ph., Tessier P., 1971. Progrès récents dans l'étude mathématique des problèmes agronomiques. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 633 à 639.

Richard H., 1963. L'azote et le pommier — Relation sur les 20 premières années d'un verger expérimental, à Vernou, en Sologne (Loir-et-Cher). *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 676 à 704.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 989-1004.

INTERVENTION

QUELQUES DONNÉES SUR LES ESSAIS DE LONGUE DURÉE RÉALISÉS A L'UNIVERSITÉ DE PENNSYLVANIE (THE JORDAN SOIL FERTILITY PLOTS) ET A L'UNIVERSITÉ DU MISSOURI [1] (SANBORNFIELD COLUMBIA)

L. GRIÈRE

Institut Mondial du Phosphate,
8, Rue de Penthièvre,
75008 Paris

LES ESSAIS DE LONGUE DURÉE DE L'UNIVERSITÉ DE PENNSYLVANIE THE « JORDAN SOIL FERTILITY PLOTS »

Ces essais constituent le plus vieil essai de fertilisation des États-Unis.

Ils ont été mis en place en 1881 par W. H. JORDAN, qui avait travaillé à Rothamsted avec SIR JOHN LAWES avant de fixer le dispositif expérimental que nous allons décrire. On étudie sur une rotation maïs, avoine, blé, mélange fourrager l'effet des traitements suivants.

I. — LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

A. — *Traitements fertilisants*

a) *Fertilisation.*

— Un témoin sans engrais.

— Les différentes combinaisons possibles de 1, 2 ou 3 des éléments NPK : N, P, K, NP, NK, PK, NPK. Dans cette partie du dispositif, les doses sont les suivantes :

N : 27 kg/ha
P_2O_5 : 54 kg/ha
K_2O : 113 kg/ha

[1] La présentation d'un certain nombre des enseignements de ces deux essais a été rendue possible grâce à l'obligeance de M. LAWRENCE F. MARIOTT, Associate Professor of Soil Technology de l'Université de Pennsylvanie, de MM. WOODRUFF de l'Université du Missouri et L. B. MILLER, Coordinator of Foreign Visitors in Agronomy, qui nous ont fourni une série de documents à partir desquels ces remarques ont été présentées.

N provient du sang desséché, P_2O_5 du noir animal puis du superphosphate, K_2O du chlorure.

— Trois doses d'azote : 27, 54, 81 dans la combinaison NPK.

— Trois formes d'azote : sang desséché, nitrate de soude, sulfate d'ammoniaque, dans la combinaison NPK, aux trois doses.

— Deux formes d'acide phosphorique : superphosphate et poudre d'os, dans la combinaison NPK, dose simple.

— Les doses indiquées ne sont apportées que sur le maïs et le blé.

b) *Fumier de ferme.*

A trois doses : 13,5 t, 18 t, 22,5 t.

Les différentes doses de fumier sont apportées à deux des cultures de la rotation, le maïs et le blé.

c) *Amendements calcaires.*

Chaux à la dose de 4,5 t/ha une fois dans la rotation avant le maïs.

Calcaire broyé, à la dose de 4,5 t/ha sur le maïs et le blé.

d) *Fumier et chaux.*

Le premier à la dose de 13,5 t, la chaux à la dose de 4,5 t. Mêmes modes d'application que dans *b*) et *c*).

e) *Plâtre agricole.*

360 kg/ha.

Il y a, au total, 25 traitements y compris le témoin, dont certains sont répétés 4 fois ou 2 fois, au total 36 parcelles pour chaque culture de la rotation.

B. — *Rotation*

Afin d'éliminer les variations dues au climat annuel, les différentes cultures de la rotation existent tous les ans, et il y a donc au total, chaque année, 4 séries de 36 parcelles.

C. — *Modifications successives du plan primitif*

Pendant 10 rotations de 1881 à 1921, l'expérience est conduite selon le plan primitif. Mais, au bout de 40 ans, l'acidité est telle sur les parcelles ne recevant pas de chaux que les rendements y sont devenus extrêmement bas. On décide donc d'apporter un amendement calcaire sur la moitié du dispositif expérimental, sous forme de calcaire broyé à l'exception des parcelles recevant déjà cet amendement et de la moitié des parcelles PK.

Enfin en 1953, on décide de diviser chaque parcelle en deux moitiés, l'une continuant à recevoir la même fertilisation qu'au début de l'expérience, l'autre moitié une fertilisation de redressement en potasse, une quantité de chaux correspondant aux besoins déterminés par l'analyse, une fertilisation phosphatée variable selon la nature des parcelles, ainsi qu'une fertilisation NPK annuelle, afin de voir comment améliorer rapidement les rendements dans les parcelles carencées. De plus, les variétés améliorées de maïs, de blé, d'avoine et de plantes fourragères cultivées depuis 1948, donnent toutes les chances d'obtenir les plus hauts rendements.

D. — *Remarques*

Niveaux de fertilisation.

Les niveaux moyens de fertilisation sur les parcelles NPK sont les suivants, par ha et par an : 13,5-27-56,5 ; 27-27-56,5 ; 40-27-56,5.

Pour l'époque, il s'agit de niveaux très élevés, supérieurs à la consommation moyenne française de 1950.

Pour la potasse, le niveau adopté est voisin de la moyenne anglaise ou hollandaise, vers les années 1970.

La fumure la plus élevée 40-27-56,5 correspond approximativement à l'apport des 18 t de fumier tous les deux ans, soit 9 t par an. En effet, sur la base d'une composition moyenne NPK de 4-2,5-5,5 par tonne, 9 t/an représentent : 36-22,5-49,5 ;

C'est dire que la dose NPK correspondant au niveau N le plus élevé est comparable au niveau moyen d'apport de fumier.

Sol.

Il s'agit d'un sol de limon décalcifié sur sous-sol calcaire.

II. — QUELQUES ENSEIGNEMENTS DES JORDAN SOIL FERTILITY PLOTS

Malgré les faiblesses du dispositif expérimental, dues à l'époque-même de son installation, on a tiré de cette expérience toute une série d'enseignements qui gardent encore, à l'heure actuelle, toute leur valeur.

A. — *Niveau de rendement des parcelles sans fertilisation*

Au bout de 50 ans de culture, sans apport extérieur, les témoins sont stabilisés à de très bas rendements. La moyenne 1931-1951, en quintaux par hectare, est la suivante :

Maïs 13,7, avoine 7,7, blé 6,0, foin 7,0.

Ces chiffres sont voisins de ceux obtenus de 1922 à 1930 :

Maïs 11,9, avoine 9,5, blé 5,2, foin 14,0.

B. — *Effet des différents engrais*

Les données suivantes sont élaborées en particulier à partir des tableaux 1 et 2 du bulletin 613 de l'Université de Pennsylvanie.

1. *Phosphate.*

— Le premier élément limitant est le phosphore. En effet, il est le seul à agir lorsqu'il est employé seul.

Rendements 1931-1952 (*q/ha*).

	Maïs		Avoine	
	Avec CaO	Sans CaO	Avec CaO	Sans CaO
Sans P	17,8	13,7	8,5	7,7
Avec P	26,3	19,4	13,7	10,4
Effet P	8,5	5,7	5,2	2,7

	Blé		Foin	
	Avec CaO	Sans CaO	Avec CaO	Sans CaO
Sans P	7,2	6,0	8,2	7,0
Avec P	13,1	9,6	24,4	13,7
Effet P	5,9	3,6	16,2	6,7

Les tableaux précédents donnent les rendements moyens des témoins et des parcelles ayant reçu la seule fumure phosphatée. Les parcelles « avec CaO » sont celles amendées en 1922-1923.

L'effet moyen sur une rotation apparaît dans le tableau ci-après :

Augmentation de rendements sur une rotation.

	Avec CaO	Sans CaO
Grain	19,6	12,0
+ foin (q/ha)	16,2	6,7
Grain	18,1	11,1
+ foin (kg/kg P_2O_5)	15,1	6,2

Il ne s'agit pas d'un effet apparent, puisqu'on le retrouve dans les comparaisons NK-NPK.

On remarquera que le chaulage a augmenté l'efficacité du superphosphate, ce qui est logique puisque le pH tombe à moins de 5,5 en 1921 dans les témoins sans engrais.

— Il est aussi compréhensible que dans la série non chaulée, on obtienne de meilleurs résultats avec les os broyés qu'avec le superphosphate.

— *Efficacité de l'acide phosphorique apporté.*

D'après F. G. Merkle (bulletin 613) en 75 ans et 18 rotations, les parcelles phosphatées ont reçu 2 000 kg de P_2O_5 dont 500 seulement auraient été utilisés, soit un coefficient d'utilisation de 25 p. 100.

L'essai ne permet pas de mesurer si les doses apportées étaient suffisantes pour obtenir le rendement maximum.

Cependant, un essai voisin mené sur le même sol de 1920 à 1940, les « New Phosphate Plots » ont montré que des apports allant de 54 à 220 kg donnaient une réponse linéaire.

2. *Potasse.*

Si K seul est sans action, l'effet PK comparé à l'effet P est important.

Par exemple, sur le maïs, on a (1931-1952) :

	Sans CaO	Avec CaO	Moyenne
Avec P	19,4	26,3	22,9
Avec PK.....	28,0	38,3	33,2
Effet K	8,6	12,0	10,3

Sur la série chaulée, l'arrière action sur avoine est de 3,9 q, l'action sur blé de 3,7 q, l'action sur foin de 14 q.

3. *Azote.*

— *Effet acidifiant de certaines fumures azotées.*

De 1881 à 1921, c'est-à-dire pendant 40 ans, les mêmes parcelles ont reçu, en plus de la fumure PK, des doses d'azote de 27, 54 et 81 kg sous trois formes, sang desséché, nitrate de soude, sulfate d'ammoniaque, tous les deux ans.

En 1921, le pH et les besoins en chaux sont donnés dans le tableau suivant :

	Témoin	PK + 27 N	PK + 81 N (sang desséché)	PK + 81 N (nitrate de soude)	PK + 81 N (sulfate)
pH	5,6	5,5	5,1	5,6	4,5
Besoins en CaO par ha (kg)	3 131	3 946	4 353	3 060	7 279

— Après correction des besoins en chaux, les différentes formes donnent des résultats sensiblement égaux.

Rendement en q/ha de 1922 à 1930 des parcelles PK + 81 N.

	Maïs		Avoine	
	Sans CaO	Avec CaO	Sans CaO	Avec CaO
Nitrate de soude	34,8	38,0	17,4	20,5
Sang	28,0	39,4	15,1	20,9
Sulfate.....	4,8	38,2	8,4	18,9

	Blé		Foin	
	Sans CaO	Avec CaO	Sans CaO	Avec CaO
Nitrate de soude	14,4	19,8	34,5	39,7
Sang	12,5	18,8	31,2	38,4
Sulfate.....	1,5	19,5	15,0	42,2

C. — CONCLUSIONS

L'ensemble expérimental des Jordan Soil Fertility Plots a permis toute une série de travaux complémentaires grâce à ces différentes parcelles traitées de la même façon pendant 75 ans. Ces travaux ont permis d'établir des recommandations permettant d'obtenir des rendements élevés.

Il était intéressant de voir si ces recommandations autorisaient un rétablissement rapide de la fertilité des terres longtemps négligées.

Aussi en 1953, divise-t-on les parcelles en deux, une moitié traitée avec la méthode d'origine, l'autre de la manière suivante :

— correction du besoin en chaux,

— apport d'une quantité de potasse donnant 280 kg de potasse assimilable par hectare,

— P_2O_5 supplémentaire aux doses suivantes :

- 70 kg/ha sur les parcelles en recevant déjà,
- 110 kg/ha sur les parcelles fumier,
- 220 kg/ha sur les parcelles n'ayant jamais reçu de P_2O_5.

Avec en plus, pour le maïs, une fumure starter NPK. Les résultats sont spectaculaires puisque le témoin sans engrais passe de 22,8 à 54,5 q, ce qui met bien en évidence la nécessité de corriger les carences en P et K et de redresser le pH pour obtenir des rendements normaux, ainsi que la possibilité d'améliorer très rapidement les rendements par une fertilisation de redressement.

50 ANS D'EXPÉRIMENTATION SUR LES ROTATIONS, LE FUMIER ET LES ENGRAIS A L'UNIVERSITÉ DU MISSOURI (SANBORN FIELD COLUMBIA)

Nous utilisons le bulletin 458, paru en 1942, qui fait le point sur les 50 premières

I. — SITUATION ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

A. — *Situation Université du Missouri à Columbia*

— *Pluviométrie.*

967 mm/an dont 187 en juillet/août.
Climat semi-continental avec d'importantes variations annuelles.

— *Sol* de limon noir à brun/gris sur 25 cm passant à une couche plus claire sur 10 à 15 cm, puis limon très argileux. Ce sol est voisin du sol de Putmam.

B. — *Protocole expérimental*

— *Rotations.*

Il y a au départ, 39 parcelles de 4 ares chacune.
Les parcelles qui restent inchangées au cours des 50 premières années correspondent aux sept rotations suivantes :

1. Maïs (culture continue).
2. Avoine (culture continue).
3. Blé (culture continue).
4. Fléole (culture continue).
5. Maïs, blé, trèfle violet.
6. Maïs, avoine, blé, trèfle violet.
7. Maïs, avoine, blé, trèfle violet, fléole fléole.

— *Traitements variables selon les rotations :*

sur 1, 2, 4, 5, 6 : témoin et 12 t de fumier,
sur 3 : témoin, 12 t de fumier, fumure minérale,
sur 7 : témoin, 12 t de fumier, fumure minérale, 6 t de fumier + 1/2 fumure minérale.

Chaque traitement s'applique chaque année à chaque culture. Il n'y a pas de répétitions, c'est-à-dire que la culture apparaît tous les ans, tous les trois ans ou tous les six ans, selon les cas.

De nombreuses modifications sont apportées après 50 ans mais nous ne tiendrons compte en principe que des données portant sur 50 ans.

II. — PRINCIPAUX RÉSULTATS

1. — *Rotation et culture continue*

• La rotation longue donne des rendements supérieurs à la rotation courte et la rotation courte est supérieure à la culture continue, quelque soit le traitement, sans ou avec fumier. En voici un exemple, sur maïs (en q/ha) :

	Sans fumier	Avec fumier
Rotation 6 ans	23,9	32,0
Rotation 3 ans	20,0	28,2
Culture continue	11,7	22,1

Il en est de même pour les autres cultures.

• Malgré la supériorité de la rotation sur la culture continue, il y a dégradation progressive des rendements là où il n'y a pas de fumier.

Dose de fumier.

La dose de 12 t/ha paraît suffisante. Exemple :

	Moyenne 1914-1938	
	Blé (culture continue)	Maïs (rotation 6 ans)
Témoin	10,1	16,3
12 t fumier	12,6	28,5
6 t fumier	13,6	28,1

2. — *Fumier et engrais chimiques*

Les doses NPK sont calculées à partir d'un objectif élevé de rendement. Ce sont les suivantes :

	N	P	K
Maïs	120	40	60
Avoine	60	25	50
Blé	80	30	55
Trèfle	120	40	105
Fléole	75	23	85

Les résultats sur 50 ans sont par exemple, les suivants :

	Témoin	Fumier	Engrais	1/2 fumier, 1/2 engrais
Blé continu	7,0	12,8	13,8	—
Rotation 6 ans :				
Maïs	23,2	30,9	27,1	25,8
Avoine	11,1	13,4	15,2	18,1
Blé	10,3	18,5	20,9	21,1
Trèfle	23,11	50,0	39,0	43,4
Fléole	29,5	60,5	63,0	53,0

Sur avoine, blé et fléole, les engrais seuls sont supérieurs au fumier seul. C'est le contraire sur maïs, le fumier assurant un rôle protecteur les années sèches.

Quant aux résultats obtenus sur trèfle, ils sont assez logiques en raison de la dose d'azote très élevée qui lui est apportée.

III. — AUTRES DONNÉES

Pluviométrie

Rendement du maïs lié à la pluviométrie d'été.

- Très bonne efficacité de la fumure phosphatée sur 25 ans. Exemple sur blé, en q/ha :

Témoin	5,6
Fumier	15,0 (6 t/ha)
Super 16 p. 100	21,0

Chaux et engrais

La chaux ajoutée aux engrais améliore les rendements sur avoine, blé et trèfle.

Fertilité

Elle est liée au maintien du taux de matière organique. Le fumier, comme les rotations, contribuent à ce maintien.

Reçu pour publication en septembre 1976.

DISCUSSION GÉNÉRALE — GENERAL DISCUSSION

J. KORKMAN.

Question : Comment expliquez-vous le fait repris dans le tableau 5 de votre texte à savoir que, dans la dernière période des essais (1950-1959), dans les parcelles NP, les rendements en sucre sont inférieurs à ceux des parcelles non fertilisées ?

R. LALOUX.

Réponse : Les rendements en racines et en sucre sont plus élevés, au cours de la décennie 1950-1959 lorsqu'aucune fumure n'est appliquée que lorsqu'une fumure NP est appliquée, parce que, dans cette dernière situation, la consommation, et par conséquent l'épuisement en K, Mg, Ca, etc., du sol, a été plus rapide et plus importante que dans les parcelles où aucune fumure n'a été apportée. Le pH est moins bas dans les parcelles « O » que dans les parcelles NP. C'est d'ailleurs ce que montraient les résultats d'analyses du sol effectuées en 1970.

D'autre part, l'N appliqué dans les parcelles NP stimule la croissance des feuilles au détriment des racines et du sucre. Ce sont là, pensons-nous, les principales raisons qui expliquent les résultats figurant au tableau 5.

J. LINDHARD.

Question : We learned yesterday that plots in the Grignon-Expt, are *spaded* for cultivation. What about the Morrow plots ?

L. F. WELCH.

Answer : Spading is not used in the Morrow plots. We use tillage implements that are used on our larger research station which is located about one kilometer from the Morrow plots. We use great care in the tillage operations. To minimize the effect of nutrient movement from plot to plot, border rows are not included in yield measurements.

B. CHEVREAU.

Question : Maize yields in the Morrow plots : is it possible to know if the yields are given in cobs or grain, at harvest time or after drying period (10 or 14 p. 100 moisture) ? Thank you.

L. F. WELCH.

Answer : Yields were expressed as quintals per hectare of grain only, on the basis of 15,5 p. 100 water.

J. F. POULAIN.

Question : Un des problèmes les plus graves qui se pose à l'agronome tropical est l'acidification des sols dès qu'on intensifie la culture. L'Afrique tropicale dispose de

réserves importantes de phosphates naturels tricalciques et nous avions pensé pouvoir limiter l'acidification par l'application de ces phosphates (redressant du même coup la carence phosphatée quasi-générale). Malheureusement, je n'ai jamais observé une remontée de pH à la suite d'application de phosphates naturels tricalciques, même à très fortes doses. Avez-vous pu différencier l'effet de la chaux de celui du phosphate sur les parcelles et sur le pH des sols ?

M. P. Cescas.

Réponse : Les résultats connus en Illinois semblent indiquer que les applications de phosphates naturels n'ont pas d'effet marqué sur la valeur du pH des sols. Une variable importante à considérer dans l'utilisation des phosphates naturels comme amendement calcaire serait alors leur teneur en $CaCO_3$ *libre.*

G. Le Buanec.

Question : Dans l'étude du bilan, avez-vous tenu compte du fait que les teneurs en phosphore des plantes dans les parcelles sans P sont en général inférieures aux moyennes données dans la littérature ?

M. P. Cescas.

Réponse : Non, des calculs approximatifs ont été faits puisque les données analytiques réelles n'étaient pas disponibles. Nous sommes d'accord avec votre remarque.

Pr A. Amberger.

Question : How would you charge the basic effect of rock phosphates ? How many kilograms of $CaCO_3$ would be equivalent to 100 kg rock phosphate ?

M. P. Cescas.

Réponse : Monsieur le Président, nous ne pouvons pas vous donner de réponse à cette question car nous n'avons pas remarqué une augmentation du pH des sols après l'application de phosphates naturels. Ce phénomène a aussi été observé par M. Poulain en zone tropicale.

L. F. Welch.

Question : You did a fine job in discussing some of the possible reasons why yields were sometimes higher with FYM than with inorganic NPK. Are there meaningful measurements that might be made by soil physicists and biochemists that could help us to better understand exactly what in the soil environment is being altered by FYM but no by inorganic NPK (or at least not changed as much by NPK as by FYM) ? Thanks. If we know what is happening perhaps we can bring about similar changes by some material other than FYM.

A. E. Johnston.

Answer : We hope to encourage cooperative work between members of the different scientific departments at Rothamsted to examine, in greater detail, the effects of the contrasted treatments on a number of soil properties. In addition, some experiments have been started, particularly, on the farm at Woburn, in which a number of organic materials are compared, to try to distinguish between the nutrient and possible structural effects of organic manures.

J.-L. CABIROL.

Question : Pourquoi dans vos modifications d'essais, n'avez-vous pas mis en place un essai NPK + fumier afin de mettre en évidence les interactions NPK et fumier ?

A. E. JOHNSTON.

Answer : In the Barnfield experiment some plots have received FYM, FYM + N, FYM + PK and FYM + NPK since 1856. Because soils treated with FYM and FYM + PK now contain so much P and K, yields now depend only on the amount of N applied. On Broadbalk, FYM + N has been tested since 1968. Yields of cereals with FYM + N are less than those given by FYM alone because the winter wheat often lodges when extra N is applied. On the other hand potato yields are larger when N is added, in addition to FYM, compared to yields given by FYM alone.

W. VAN BENTEN.

Question : Could you please elaborate a little more on the philosophy, and the value of long-term fert. exp. :

a) combining the major fields in different countries ;
b) major result for developing agriculture ;
c) further aims for future work.

A. E. JOHNSTON.

Answer : It is difficult to answer this question in full. Very briefly I believe that long-term experiments should aim to establish soils with constrated properties. These soils can then be and have been used to test, on subplots, treatments designed to provide information on current problems. In addition I think that this conference has shown that there is much in common between the results of different long-term experiments. Investigation of the differences would, I am sure, led to much valuable new work being done. The aim of all those concerned with long-term experiments must be to make considered changes to keep the results relevant to current farming conditions

F. JACQUIN.

Question : Les excellents résultats obtenus à Rothamsted après apport de fumier sont certainement liés au fractionnement annuel... Votre équipe de chercheurs a-t-elle étudié la corrélation entre nutrition minérale optimum et turn-over des groupements fonctionnels de la matière organique de ces sols ?

A. E. JOHNSTON.

Answer : I beleive that the good results got with FYM are due, in part, to the large amount of FYM, 35 t ha^{-1}, applied each year. Unfortunately, no work has been done on mineral nutrition and the turn-over of organic functional groups in the soil organic matter. Recently work has been started in which it is hoped to investigate possible relationships between various fractions of soil organic matter and soil structure.

A. VEZ.

Question : In your plot with FYM, do you give FYM each year? does it mean that you give each year more than 200 kg total N?

A. E. JOHNSTON.

Answer : Yes. FYM is applied each year. Fertilizer N, in increments of 48 kg N ha^{-1}, is applied to sub-plots of the FYM-treated plot. One sub-plot always receives only FYM.

V. HERNANDO.

Question : What about minor elements and specially Mn as other reason of the higher yields with FYM?

A. E. JOHNSTON.

Answer : We do not think that micronutrients supplied in FYM contribute to the effects we observe where FYM is applied in Rothamsted experiments. At Woburn we occasionnally observe what we think are micronutrient deficiencies. Where we have tested for micronutrient effects by spraying crops with appropriate solutions we have divided plots and tested the effect of the nutrient in question on the divided plot.

M. BOYELDIEU.

Question : In Japan, have you a single or two crops of rice/year? (If two, are the figures of the yields the total or the mean of the two harvests?)

H. MATSUO.

Answer : In only warm Southern areas, two or three crops of rice can be carried out in a year. However, it is now almost no place to do such croppings because rice has been produced in surplus since 1970.

J.-F. POULAIN.

Question : Peut-on avoir des précisions sur la *nature des composts* utilisés dans les expérimentations. S'agit-il de pailles de riz? Si oui un simple recyclage des résidus de récoltes ne permet pas d'obtenir des quantités aussi importantes que celles utilisées. Les compléments de paille pour fabriquer les composts proviennent-ils de rizières à fortes fumures?

H. MATSUO.

Answer : The materials for producing compost are used only these produced in that area.

J. BOYELDIEU.

Question : Is the straw of the rice ploughed in the soil?

H. MATSUO.

Answer : Used to be I should say « Yes », together with stubbles, but it has been heavily changed. Now the utilization of straw becomes a difficult problem for each farmers.

P. Ott.

Question : What kind of compost was used? (municipal refuse, agricultural waste)....

— What was the NPK value of this compost? (possible variations during the experiment).

— Could green manuring be used in conjonction with compost in order to reduce the necessary amount of compost. What is the estimation of now available compost, of potentially available compost.

— What would be the ratio of potentially available compost to the acreage of rice in Japan?

H. Matsuo.

Answer : Same as the question before.

— N = 0.3 ~ 0.5 p. 100 ; P_2O_5 — 0,08 ~ 0,1 p. 100 ; K_2O — 0.5 p. 100.

— Decreasing heavily with proceeding industrialization taking place.

— Used to be about I ton/ha applied. Nowaday, rice straw is burning after the harvest mostly.

De La Lande Cremer.

Question : What kind of compost was used in your experiments?

H. Matsuo.

Answer : Mostly an artificial compost is used, which is produced from rice straw, nitrogen fertilizer, lime, etc., piling in a dark yard and two or three times turned it over during the production time.

V. Hernando.

Question : I wonder if the cold resistance is not related to the Boron level in compost? Have you any information about it?

H. Matsuo.

Answer : I cannot answer at this moment. Later on report to the committee of this conference.

A. Vez.

Questions : Ne pensez-vous pas que l'effet positif des fongicides en monoculture est dû essentiellement au traitement précoce, diminution du piétin-verse, augmentation des talles fertiles?

— Avez-vous constaté des différences de maladies du feuillage et de l'épi entre les parcelles en monoculture ou en rotation dans les variantes non traitées?

J. Boyeldieu.

Réponses : Certainement *Cercosporella* est le principal responsable de la baisse de rendement avec *Fusarium roseum* (il n'y a pas d'*Ophiololus graminis*).

— Non, pas de façon sensible.

PRÉSENTATION DES EXPÉRIENCES DE DIKOPSHOF (1904) PAR LE Pr A. AMBERGER

At the end of the session 4 the chairman (Pr-Dr A. AMBERGER) informed the participants about a letter of Pr-Dr BOEKER, Bonn, in which he gave some details about two long-term fertilizer trials on Dikopshof, the experimental farm of the University Bonn :

The first trial (3.5 ha) was started 1904 ; the cropping system is : sugar beet – wheat – rye – clover – oats.

One half of the area received stable manure regularly. There is the following fertilization plan :

1. NPK Ca.
2. —PK Ca.
3. N — K Ca.
4. NP — Ca.
5. NPK —.
6. – – – –.

The rate of mineral fertilization was kept nearly constant during the last 70 years. Besides proving the yields investigations on soils were carried out.

The recent dissertation of Schroeder delt with the different water uptake of crops in the various plots. On behalf of the continuous measurement of the climatic dates this trial served also for the development methods to predict yields early in the year. This was the subject of a habilitation thesis (Pr HANUS).

The second trial (0.75 ha) was started 1906 ; the cropping system is : sugar beets – wheat – legumes – rye without any stable manure at all.

The aim of this trial is to study the effect of long-term potash and nitrogen fertilizer application according to the following plan :

1. NP Ca + K as kainite.
2. NP Ca + K as KCl (40 p. 100 K_2O).
3. NP Ca + K as K_2SO_4.
4. NP Ca —
5. PK Ca + N as calcium cyanamide.
6. PK Ca + N as ammonium sulfate.
7. PK Ca + N as sodium nitrate.
8. PK Ca —

Annual yields and soil properties have been investigated and registrated.

5e SÉANCE — 5th SESSION

COMMUNICATIONS SUR LES ESSAIS DE LONGUE DURÉE SUR PRAIRIES
PAPERS ON LONG-TERM TRIALS ON GRASS

Président de séance : Professeur S. HÉNIN

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 1007-1026.

EXPÉRIENCE DE FERTILISATION MINÉRALE ET ORGANIQUE SUR PRAIRIE PERMANENTE — ILE D'AMELAND (1899-1969)

L. C. N. DE LA LANDE CREMER
avec la collaboration technique de L. VAN DER VEEN

Instituut voor Bodemvruchtbaarheid (Institut pour l'Étude de la Fertilité du Sol), Oosterweg 92, Haren, Gr. (Pays-Bas)

RÉSUMÉ

Un essai de fertilisation fort simple fut établi en 1899 et exploité jusqu'en 1969 sur une prairie permanente en sol sablonneux d'origine maritime de l'île d'Ameland, située devant la côte Frisonne des Pays-Bas.

Cette expérience était destinée à l'origine à promouvoir l'utilisation des engrais artificiels. Les traitements suivants furent comparés avec ceux de parcelles non fertilisées : fumure annuelle avec 20 tonnes de fumier de bovins par ha, fumure minérale complète (NPK), fumure minérale sans azote (PK) et fumure comprenant la moitié des doses du fumier et la moitié de la fumure minérale complète.

Au début, l'apport des éléments nutritifs ne fut pas égalisé pour les traitements au fumier et aux engrais minéraux, le premier étant désavantagé dans les apports en phosphate et en potasse.

Malgré ce point faible dans l'expérimentation, cet essai procura, grâce à sa longue existence, quelques enseignements assez remarquables. Il s'avéra par exemple que malgré son désavantage dans l'approvisionnement en éléments nutritifs (tabl. 4), le traitement au fumier réussit à la longue à égaler et même à dépasser la production d'herbe du traitement à fumure minérale complète. La production obtenue avec 20 tonnes de fumier par ha et par an qui n'était au début de l'expérience que d'environ 80 p. 100 en moyenne de celle obtenue avec le traitement NPK sous forme d'engrais minéraux, passa progressivement à 110 p. 100 de celle-ci à la fin de l'expérience (fig. 2). Ce phénomène aurait pu être expliqué par une diminution de la production d'herbe sur le traitement NPK or celle-ci ne montra aucun fléchissement, le traitement NPK recevant d'ailleurs un apport croissant d'azote minéral (tabl. 1).

Cette action étonnante du fumier doit être attribuée en majeure partie sinon totalement à une augmentation de la teneur en humus du sol et à la libération consécutive par minéralisation de l'azote organique apporté par le fumier dont les arrière-effets cumulés s'ajoutent à l'action directe de celui-ci en première année.

L'augmentation de la réserve en humus eut également comme conséquence une augmentation de la réserve en eau utile du sol qui, sur le traitement au fumier, dépassa de 16 mm la quantité trouvée avec le traitement aux engrais minéraux (tabl. 12). Cependant il s'avéra que cette différence ne joua pas un rôle important dans l'amélioration signalée des rendements de la première coupe d'herbe du traitement au fumier (tabl. 13).

L'efficacité de l'azote du fumier sembla négligeable au début de l'expérience, probablement à la suite d'un apport insuffisant en phosphate et potasse. Cet apport ne fut pas modifié et l'apport en azote minéral du traitement NPK fut même augmenté. Malgré cela, l'efficacité de l'azote du fumier grandit grâce aux arrière-effets dus à la minéralisation de l'azote organique : 100 kg d'azote du fumier équivaudraient finalement à 70 kg d'azote minéral sous forme d'ammonitrate.

Au cours de l'expérience, quelques fluctuations assez considérables se sont manifestées quant au niveau de production de l'herbe (fig. 1). Les périodes en question chevauchent les époques où il y eut également un changement de la forme d'azote minéral utilisée (fig. 1). Cependant la forme d'azote n'a pu être la cause de ces variations qui durent plutôt être occasionnées par des effets climatologiques (fig. 1).

La fumure complète aux engrais minéraux pendant 70 années consécutives n'a pas diminuée le niveau de production de la prairie. L'utilisation du fumier seul ou en combinaison avec des engrais minéraux a finalement abouti à un niveau de rendement de 10 p. 100 supérieur à celui du traitement complet (NPK) aux engrais minéraux.

La qualité botanique du gazon (tabl. 9) diminua pendant les trente dernières années, surtout sous l'influence de la fumure minérale. Le sol du témoin non fertilisé devint acide à la fin de l'essai et présenta une couche feutrée de 4 à 5 cm d'épaisseur par suite d'une dégradation ralentie des débris organiques. Sporadiquement, quelques *Orchis maculatus* L. y croissaient.

I. — INTRODUCTION

L'expérience de fertilisation de longue durée sur l'île d'Ameland fut à l'origine de l'un des innombrables essais de vulgarisation pour l'emploi d'engrais minéraux. La plupart de ceux-ci eurent un plan de fumure fort simple comportant généralement quatre parcelles, dont une ne recevait aucune fertilisation (témoin), les 2 autres recevant respectivement du fumier, une fumure minérale complète (NPK) et la dernière la moitié des doses de cette fumure minérale + la moitié de celle du fumier. Quelquefois le plan d'expérimentation comprenait encore quelques autres traitements où l'un des autres éléments nutritifs (P ou K) faisait défaut.

La plupart de ce genre d'essais n'existèrent que quelques années, d'autres subsistèrent plus longtemps ; parmi eux, deux essais sur prairie naturelle de l'île d'Ameland, une des îles Frisonnes situées devant la côte des Pays-Bas. Ils furent établis sur la même prairie, respectivement en 1899 et 1900, à côté l'un de l'autre, avec un plan d'expérimentation quelque peu différent, mais les apports d'éléments nutritifs y furent les mêmes et les conditions de leur exploitation (date de fumure, soins, récoltes, etc.) identiques. Ces essais furent terminés en 1969. La prairie fut alors rompue et réensemencée ; une expérience avec des quantités croissantes d'azote minéral et un apport plus important d'engrais phosphatés et potassiques fut ensuite réalisée sur les anciens traitements. Cette dernière expérience fut arrêtée en 1972.

Ce compte rendu englobera seulement la période de 1899 à 1970 des deux essais qui, en raison de leur même mode d'exploitation, seront considérés comme formant une seule expérience.

Le motif de faire subsister aussi longtemps des essais au fond fort simples n'est pas connu. Peut-être a-t-on simplement voulu savoir si les engrais minéraux pourraient aussi à la longue concurrencer le fumier sans porter préjudice au niveau de rendement du sol. Mais alors le dosage des éléments nutritifs sur les traitements avec fumier et avec engrais minéraux complets jusqu'en 1955 fut mal choisi pour pouvoir répondre à la question, l'apport de phosphore et de potasse sur le traitement « fumier » étant inférieur à celui de la fumure minérale complète (tabl. 4). L'égalisation ne s'effectua seulement que dans les deux dernières périodes (= 14 années) de l'expérimentation.

Notre Institut qui fut chargé de l'exploitation de cette expérience à partir de 1962 trouva qu'il valait la peine de continuer encore quelques années la longue suite d'observations, le traitement fumier montrant en effet une différenciation assez surprenante des rendements par rapport à ceux avec engrais minéraux. D'autre part il pouvait être utile de disposer d'une longue série d'observations pour une étude éventuelle des influences climatologiques sur les rendements en herbe obtenus avec des régimes de fertilisation différents. Finalement les changements s'opérant dans le sol à la suite des traitements effectués, dont quelques-uns même très constants, justifient une attention prolongée et la continuation de l'expérience. Celle-ci fut finalement interrompue à la suite d'économies budgétaires.

II. — PLAN D'ESSAI

Les deux essais dont il s'agit ici furent établis avec une année d'intervalle sur la même parcelle, l'un à côté de l'autre. Le plus ancien des deux comprenait des parcelles sans fumure, avec fumure minérale complète (NPK), avec fumier et avec la demi-dose de fumier et de fumure minérale complète. La seconde comprenait outre les trois premiers traitements, une parcelle ne recevant que du P et K sous forme minérale.

Les deux essais seront discutés comme formant une même expérience, les quantités d'éléments apportés et les différents traitements appliqués étant tout à fait identiques. Seuls trois des traitements ont donc ainsi une répétition.

Les parcelles utilisées à l'époque furent assez grandes. La première (sans fumure) mesurait 4 × 23 m, les sept autres 8 × 23 m. Elles se situaient le long d'une ligne orientée nord-sud.

Le sol était un sable d'origine maritime, avec une couche humifère d'à peu près 25 cm et une situation assez élevée par rapport à la nappe phréatique.

III. — FUMURES APPLIQUÉES

A. — *Azote*

La dose d'azote minéral donnée à la première coupe d'herbe (= foin) passa de 16 kg/ha en 1899 à 50 kg en 1969. Le tableau 1 indique les quantités et les formes d'azote utilisées.

En 1917, il n'y eut pas de fumure azotée et, en 1947, seulement une dose de 25 kg N/ha sous forme de nitrate d'ammoniaque.

La seconde coupe d'herbe n'a reçu l'azote minéral que depuis 1955 (sauf en 1966) et uniquement sur les parcelles recevant de l'azote minéral (NPK et 1/2 NPK + 1/2 fumier). Avant 1955, la seconde coupe ne reçut de l'azote minéral qu'à cinq occasions, notamment 20 kg N/ha sous forme de sulfate d'ammoniaque dans les années 1940, 1943 et 1944, et d'ammonitrate en 1948 et 1950.

Le traitement 1/2 NPK + 1/2 fumier n'a reçu que la moitié des quantités mentionnées.

B. — *Phosphates*

Le tableau 2 indique les quantités et formes des phosphates minéraux utilisées. Le traitement PK a reçu les mêmes quantités et formes que le traitement NPK et le traitement 1/2 NPK + 1/2 fumier les mêmes formes mais la moitié des quantités.

La seconde coupe d'herbe ne reçut pas de fumure phosphatée.

Il n'y eut pas de fumure phosphatée dans les années 1901, 1904 et 1918.

TABLEAU 1

Quantités et formes d'azote utilisées

Période d'essai	Forme	kg N/ha 1re coupe	kg N/ha 2e coupe
1899-1903	ch	16	—
1904-1907	ch	24	—
1908-1918	ch	32	—
1919-1946	za	40	—
1948-1950	ks	48	—
1951-1961	kas	40	40 (1)
1962-1969	kas	50	50

ch = nitrate de soude, za = sulfate d'ammoniaque, ks = nitrate de chaux, kas = ammonitrate.

(1) Depuis 1955.

TABLEAU 2

Quantités et formes de phosphates minéraux utilisées

Période d'essai	Forme	P_2O_5 (kg/ha)
1899-1916	slak	96
1917	—	14
1919-1923	sup	108
1924	slak	96
1925-1927	sup	72
1928-1954 (1)	slak	128
1955-1961	sup	144
1962-1969	dsup	72

slak = scories de déphosphoration, sup = superphosphate, dsup = superphosphate double, sulkaphos = sulfate de potasse phosphaté.

(1) 1942 : 120 kg comme sulkaphos-C.
1949 : 108 kg comme superphosphate.

C. — *Potasse*

Le tableau 3 indique les quantités et les formes d'engrais potassiques utilisées sur les traitements avec engrais minéraux. Le traitement PK reçut les mêmes doses et formes et le traitement 1/2 NPK + 1/2 fumier la moitié des doses de la fumure minérale complète.

Il n'y eut pas de fumure potassique à la seconde coupe ni dans les années 1901, 1904 et 1918.

TABLEAU 3

Quantités et formes d'engrais potassiques utilisées

Période d'essai	Forme	K_2O (kg/ha)
1899-1900	kn	130
1902-1917	kn	100
1919-1924	K-20	100
1925-1938	K-40	100
1939-1946 (1)	K-40	120
1947	K-50	125
1948	K-40	120
1949	K-60	120
1950	K-40	100
1951-1954	K-40	80
1955-1969	K-60	100

kn = kaïnite, K-20 = potasse 20 p. 100, K-40 = potasse 40 p. 100, K-50 = potasse 50 p. 100, K-60 = potasse 60 p. 100, sulkaphos = sulfate de potasse phosphaté.

(1) En 1942 : 240 kg K_2O/ha comme sulkaphos-C.

D. — *Magnésie*

Depuis 1962 l'apport de magnésie sur les traitements NPK et PK a été rendu égal à celui fait par le fumier (30 kg de MgO/ha sous forme de kiésérite). Le traitement 1/2 NPK + 1/2 fumier a reçu la moitié de cette dose sous forme minérale. Dans les années antérieures à 1962, l'entretien en magnésium des parcelles traitées aux engrais minéraux s'effectua par les scories de déphosphoration, la kaïnite, le K-20 p. 100 et le K-40 p. 100 utilisés.

E. — *Chaux*

Les traitements aux engrais minéraux ont été chaulés en 1899 et 1900 avec 1 000 kg de chaux et le traitement 1/2 NPK + 1/2 fumier avec 500 kg. La forme utilisée ne fut pas mentionnée.

F. — *Fumier*

Au cours de l'expérience, on appliqua 69 fois du fumier de bovins à la dose de 20 tonnes par ha (1944 = 25 tonnes). Pendant les 7 premières années, il y eut deux années sans fumier. Cette omission n'influença d'ailleurs pas le rapport des rendements moyens entre le traitement au fumier et celui aux engrais minéraux complets, selon qu'on le calcule seulement pour les cinq années avec fumier ou pour les sept années de toute la période. L'efficacité de l'azote du fumier à donc dû être restreinte au début de l'essai.

Rappelons que 20 tonnes de fumier apportent 100 kg N, 60 kg de P_2O_5, 80 kg de K_2O et 30 kg de MgO par an.

G. — *Aperçu général des apports totaux et moyens en éléments nutritifs par la fumure entre 1899 et 1969*

Le tableau 4 résume les apports totaux et moyens en éléments nutritifs faits par les engrais minéraux et le fumier pendant la période expérimentale entre 1899 et 1969.

TABLEAU 4

Apport total et moyen en éléments nutritifs par traitement entre 1899 et 1969 exprimé en kg et en kg par ha

Traitement	N				P_2O_5		K_2O		MgO (1)	
	1re coupe	2e coupe	total	p. an	1re coupe	p. an	1re coupe	p. an	1re coupe	p. an
Témoin	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NPK	2 639	730	3 369	48	7 432	106	7 167	102	2 000	29
PK	—	—	—	—	7 432	106	7 167	102	2 000	29
1/2 NPK + 1/2 fumier	4 780	365	5 145	74	5 793	83	6 353	91	2 040	29
Fumier	6 925	—	6 925	99	4 155	59	5 540	79	2 078	30

(1) Les engrais minéraux apportèrent 300 kg de MgO sous forme de kiésérite dans la période 1962-1969. Dans les années antérieures à cette période, l'approvisionnement se fit par les engrais phosphatés et potassiques utilisés.

En continuant l'expérience en 1962, il fut décidé de ne pas apporter de profonds changements dans le niveau d'approvisionnement en éléments nutritifs. On se borna à égaliser l'apport de ces éléments entre les divers traitements. L'apport total en azote minéral (100 kg par ha) fut dorénavant réparti en doses de 50 kg /ha avant la première et avant la seconde coupe.

Remarquons encore que l'apport total et l'apport moyen en éléments nutritifs par le fumier furent inférieurs à ceux du traitement NPK jusqu'en 1962. Ceci fut un sérieux désavantage pour ce traitement ainsi que pour l'interprétation des résultats de l'expérience. C'est seulement durant la dernière période (= 7 années) que ces différences furent éliminées.

IV. — RENDEMENTS

En vue d'une présentation claire, les rendements ont été résumés en rendements moyens par période de 7 années (tabl. 5). Afin de pouvoir suivre leur évolution au cours de l'expérience ces rendements moyens ont été comparés à celui du témoin de la première période. Les influences éventuelles d'autres facteurs (forme d'engrais utilisé, influences climatologiques, etc.) sont ainsi maintenues, ce qui ne serait pas le cas si le témoin de chaque période était pris comme base de référence.

Le tableau 6 donne les rendements de la seconde coupe.

TABLEAU 5

Rendements moyens en foin (85 p. 100 de matière sèche)
de la première coupe en kg par ha et par an
par périodes de 7 années et en pourcentage de ceux du témoin de la période 1900-1906

Période	Rendement moyen en foin en kg/ha/an					Rendement moyen en pourcentage du témoin (1)				
	témoin	NPK	fumier	1/2 + 1/2(2)	PK	témoin	NPK	fumier	1/2 + 1/2 (2)	PK
1900-1906	2 407	5 458	4 427	5 771	4 311	100	227	184	240	179
1907-1913	2 143	6 288	5 068	5 925	4 968	89	261	210	246	206
1914-1920	2 129	6 781	6 177	6 621	5 718	89	281	256	275	238
1921-1927	1 541	5 691	5 325	5 207	4 936	64	236	221	216	205
1928-1934	1 474	5 462	5 051	5 094	4 961	61	227	210	211	206
1935-1941	1 256	5 432	5 642	5 165	5 011	52	225	234	214	208
1942-1948	1 357	4 667	5 289	5 692	4 529	56	194	220	336	188
1949-1955	1 270	6 742	6 709	7 307	5 243	53	280	278	303	218
1956-1962	1 130	5 362	6 158	6 259	4 120	47	223	256	260	171
1963-1969	1 549	6 101	6 434	6 760	4 481	64	253	267	280	186

(1) de la période 1900-1906.
(2) 1/2 NPK + 1/2 fumier.

TABLEAU 6

Rendements moyens de la seconde coupe en kg par ha par an pour le traitement NPK
et en pourcentage de celui-ci pour les autres traitements

Période	Matière sèche, kg/ha traitement NPK	Rendement en pourcentage du traitement NPK			
		NPK	fumier	1/2 + 1/2 (1)	PK
1907-1913	2 294	100	85	111	115
1935-1941	2 713	100	92	101	81
1942-1948	2 338	100	120	135	103
1949-1955	1 846	100	141	145	90
1956-1962	2 836	100	98	102	66
1963-1969	3 240	100	93	103	67

(1) 1/2 NPK + 1/2 fumier.

V. — COMPOSITION CHIMIQUE DE L'HERBE

Les analyses chimiques de l'herbe n'ont été effectuées régulièrement que depuis 1957 pour chacune des deux coupes récoltées. Avant cette date il n'y eut d'analyses qu'en 1943 et 1944. Le tableau 7 mentionne les résultats pour les années 1943 et 1969.

TABLEAU 7

Analyses chimiques de la première et seconde coupe d'herbe des années 1944 et 1969

Traitements	Coupe et année	Matière sèche (%)	En pourcentage de la matière sèche				
			p.b.d. (1)	N	P_2O_5	K_2O	MgO
Témoin	1re 1943	26,7	12,0	1,92			
NPK	1re 1943	22,7	11,2	1,79			
PK	1re 1943	23,6	11,4	1,82			
Fumier	1re 1943	26,3	11,3	1,81			
1/2 NPK + 1/2 fumier	1re 1943	22,5	11,4	1,82			
Témoin	2e 1943	19,5	12,9	2,06			
NPK	2e 1943	19,1	12,6	2,02			
PK	2e 1943	19,0	12,5	2,00			
Fumier	2e 1943	18,2	12,8	2,05			
1/2 NPK + 1/2 fumier	2e 1943	19,0	11,4	1,82			
Témoin	1re 1969	30,7	13,2	2,11	0,65	2,22	0,29
NPK	1re 1969	18,5	11,8	1,88	0,92	2,13	0,36
PK	1re 1969	20,4	11,6	1,86	1,01	2,88	0,31
Fumier	1re 1969	17,3	12,6	2,02	0,88	1,98	0,47
1/2 NPK + 1/2 fumier	1re 1969	17,4	12,2	1,95	0,90	2,01	0,40
Témoin	2e 1969	29,5	12,8	2,05	0,59	2,03	0,38
NPK (2)	2e 1969	20,7	11,7	1,87	0,95	1,82	0,52
PK	2e 1969	23,1	12,	1,92	1,08	2,80	0,38
Fumier	2e 1969	17,6	13,7	2,19	0,97	1,81	0,81
1/2NPK + 1/2 fumier (2)	2e 1969	15,7	12,5	2,00	1,03	1,69	0,62

(1) Protéines brutes digestibles.
(2) Depuis 1955, les secondes coupes de ces traitements ont reçu respectivement 50 en 25 kg N/ha.

En 1943, la première coupe fut effectuée le 9 juin et la seconde le 7 septembre. En 1969, les dates de fauchage furent le 12 juin et le 19 août. On se souviendra que les traitements NPK et 1/2 NPK + 1/2 fumier reçurent dès 1955 respectivement 50 kg et 25 kg d'azote minéral avant la seconde coupe, ce qui n'était pas l'habitude auparavant.

VI. — COMPOSITION BOTANIQUE

Dans les années 1940, 1962 et 1969 furent effectués des examens botaniques de la première coupe d'herbe. Le tableau 8 en donne un aperçu sous forme du pourcentage des catégories principales exprimées en poids sec et la qualité du gazon calculée sur cette base (10 = très bonne, 1 = mauvaise) est présentée dans le tableau 9.

TABLEAU 8

Aperçu des examens botaniques, en pourcentages du poids sec de la première coupe d'herbe

Catégorie	Année	Témoin	NPK	Fumier	1/2 NPK + 1/2 fumier	PK
Bonnes herbes	1940	9,0	24	39	35	
	1962	2,0	39	31	27	14
	1969	2,5	8	30	18	6
Légumineuses	1940		5	3	4	
	1962		2,5	0,5	1	15
	1969	+	+			1
Herbes médiocres	1940		22	14	19	
	1962	1	12	11	11	11
	1969	2	21	26	32	17
Herbes inférieures	1940		44	33	35	
	1962	55	30	20	18	41
	1969	57	59	31	37	57
Pseudo herbes	1940					
	1962	25	+			2
	1969	37	+	+		4
Autres herbacées	1940		7	13	7	
	1962	14	26	33	28	13
	1969	2,5	12	14	13	15

TABLEAU 9

Qualité du gazon

(10 = très bonne ; 1 = très mauvaise)

Date	Témoin	NPK	Fumier	1/2 + 1/2 (1)	PK
3-6-1940	3,2	6,0	5,9	5,9	5,0
10-5-1962	3,4	5,2	5,2	5,8	5,1
6-1969	3,0	4,5	5,4	5,0	4,3

(1) 1/2 NPK + 1/2 fumier.

VII. — ANALYSES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DU SOL

La première analyse chimique du sol de cette expérience fut faite en 1937. L'état de fertilité au départ de l'essai est donc inconnu. Le tableau 10 donne les analyses du sol de la dernière année (1969) et le tableau 11, quelques autres déterminations effectuées en 1938.

TABLEAU 10

Analyse chimique du sol en 1969

Détermination	Couche (cm)	Témoin	NPK	PK	Fumier	1/2 + 1/2*
pH-HCl	0-5	3,7	4,8	4,2	4,7	4,8
	5-10	3,7	4,9	4,5	4,3	4,8
	10-20	3,9	5,1	4,9	4,2	4,9
Humus (1)	0-5	6,2	5,6	5,8	5,8	5,4
	5-10	4,5	4,7	4,8	5,4	4,6
	10-20	3,4	3,0	3,6	4,0	3,0
P-AL (2)	0-5	12	53	47	19	39
	5-10	6	63	61	18	45
	10-20	5	57	75	28	47
P-get (3)	0-5	11	14	21	17	16
	5-10	4	14	14	12	16
	10-20	1	10	10	10	9
Pw (4)	0-5	28	74	85	69	75
	5-10	13	70	80	29	68
	10-20	8	62	73	32	55
K-get (5)	0-5	25	15	26	15	14
	5-10	12	9	7	7	6
	10-20	10	8	12	9	8
MgO (6)	0-5	87	154	141	230	182
	5-10	64	121	116	144	141
	10-20	43	77	99	112	96
N (7)	0-5	220	205	220	305	230
	5-10	170	185	170	225	200
	10-20	145	130	160	180	140

* 1/2 NPK + 1/2 fumier.

(1) Humus, perte au feu.

(2) P-AL = mg P_2O_5 par 100 g de terre sèche d'après la méthode lactate d'ammonium-acide acétique.

(3) P-get = mg P_2O_5 par 100 g de terre sèche, soluble dans de l'eau à 50°C.

(4) Pw-get = mg P_2O_5 de terre sèche, soluble dans l'eau (par litre).

(5) K-get $= \frac{10 \times \text{K-HCl}}{a \times h}$ (h = pourcentage d'humus ; a = facteur de conversion).

(6) MgO = mg de MgO par kg de terre sèche, déterminé dans une solution de NaCl 0,5 N.

(7) N = pourcentage de N d'après Kjedahl × 1 000.

TABLEAU 11

Degré de saturation en cations (V) *en pourcentage, teneur en cations échangeables* (S) *en pourcentage et capacité de fixation en cations* (T) *en milliéquivalents par 100 g de sol de la couche de 0-5 cm en 1938*

	V	S	T	pH-H_2O
Témoin	22,2	2,4	10,8	4,7
NPK	62,8	7,6	21,1	5,6
PK	83,1	10,3	12,4	6,3
Fumier	63,2	8,4	13,3	5,6
1/2 NPK + 1/2 fumier	73,5	9,7	13,2	6,0

En 1962 et 1969, les quantités d'eau utile furent mesurées sur chaque parcelle, c.a.d. la différence des volumes d'eau absorbée en pour cent entre pF_2 et pF_4, dans la couche de 0-25 cm (tabl. 12).

TABLEAU 12

Quantité d'eau utile en mm par ha

Traitement	1962	1969	Moyenne
Témoin	36	30	33
NPK	45	42	44
Fumier	62	57	60
1/2 NPK + 1/2 fumier	66	60	63

VIII. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

Le niveau de rendement du témoin sans fumure fut réduit de moitié au cours de l'expérience (tabl. 5, fig. 1).

Les rendements des quatre traitements fertilisés évoluèrent plus ou moins parallèlement avec deux maximum distincts dans la troisième et depuis la huitième période. Cette évolution des rendements correspond à la fois à un changement de la forme d'azote minéral utilisé et à des périodes caractérisées par plus ou moins de précipitations aux mois de février à juin (fig. 1). Comme les traitements PK et fumier suivent également cette évolution sans avoir reçu d'azote minéral, la forme d'azote utilisée ne peut en être la cause.

La quantité d'azote minéral utilisée fut régulièrement augmentée au cours de l'expérience (tabl. 1). L'approvisionnement en phosphate et en potasse montre

bien quelques fluctuations (tabl. 2 et 3), mais celles-ci ne peuvent expliquer les variations dans les rendements. D'autre part la somme des précipitations des mois de février à juin n'est pas non plus en corrélation avec les rendements. Il n'est pourtant pas trop invraisemblable que la distribution des précipitations et de la température ait jouée un rôle prépondérant dans cette évolution.

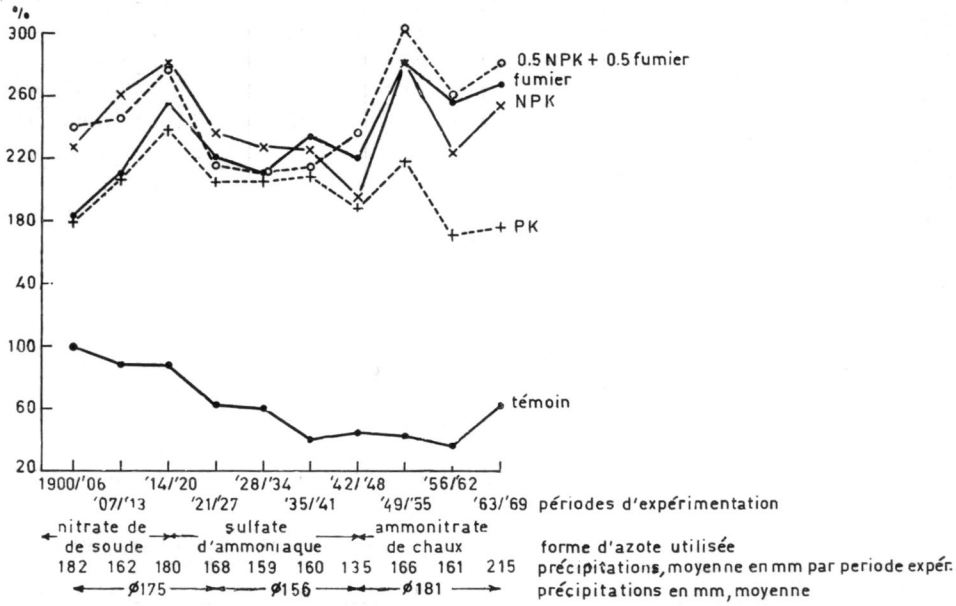


FIG. 1. — *Rendements relatifs en matière sèche de la première coupe d'herbe par rapport au témoin, en 1900-1906*

(= 2 407 kg/ha en moyenne)

Un autre phénomène assez remarquable celui-ci, se présente sur les deux traitements fumier : au départ, l'action de l'azote du fumier sembla assez restreinte dans les deux premières périodes de l'expérience (comparez l'effet sur les rendements d'un apport d'azote minéral par période — respectivement 21 et 31 kg/ha dans les deux premières périodes — avec celui du fumier avec 100 kg de N et sur le traitement PK sans N) (tabl. 1 et 5). L'action de l'azote du fumier semble donc être inférieure à celle connue d'après d'autres expériences sur prairie (KOLENBRANDER et DE LA LANDE CREMER, 1967). Mais cet effet peut être masqué par un apport de phosphates et de potasse trop restreint dans le fumier par rapport au traitement NPK (tabl. 2 et 3 et § V).

L'apport en phosphates minéraux fut en effet juste suffisant pour une prairie pauvre en phosphore, fauchée une fois par an et pâturée ensuite. Or l'approvisionnement par le fumier était de 36 kg/ha inférieur à la dose requise. Le rendement obtenu avec le traitement combiné (1/2 NPK + 1/2 fumier) apportant 20 kg de P_2O_5 en plus fut considérablement supérieur à celui du fumier.

La dose moyenne de potasse fut insuffisante pour les prairies pauvres en cet

élément, fauchées une fois par an et pâturées ensuite, aussi bien pour les traitements aux engrais minéraux que pour ceux au fumier.

L'approvisionnement en magnésie fut également insuffisant pour tous les traitements fertilisés.

En considérant les résultats des analyses du sol en 1969 (tabl. 10), les réserves nutritives au départ de l'expérience n'ont pas dû être très élevées non plus.

Malgré tous ces désavantages au détriment du traitement fumier, on peut observer sur la figure 2 que l'action de l'azote du fumier s'améliora progressivement de sorte que les rendements de ce traitement égalèrent ceux du traitement NPK dans la période 1935-1941 pour ensuite même les dépasser.

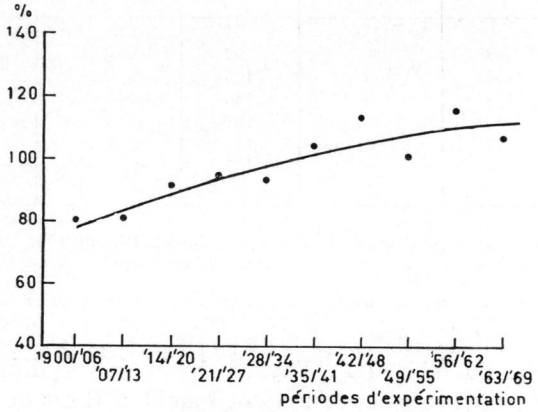


FIG. 2. — *Rendements relatifs en matière sèche de la première coupe d'herbe du traitement au fumier en pourcentage du traitement NPK, par périodes d'expérimentation*

Dans la figure 2, les rendements sont rapportés, par périodes, à ceux du traitement NPK, pour éliminer les influences du climat. Une fumure annuelle avec 20 t/ha pendant une longue période laisse donc à la longue, apparaître une action surprenante du fumier. La question se pose maintenant de savoir à quoi cette étonnante amélioration doit être imputée.

D'après les données des analyses chimiques du sol en 1969 (tabl. 10), cette amélioration n'a pas pu être provoquée par un meilleur approvisionnement en phosphate et en potasse par rapport au traitement NPK. La cause doit plutôt être recherchée dans l'augmentation de la réserve en humus et des facteurs qui y sont liés comme l'augmentation de l'azote assimilable à la suite de la libération graduelle, par minéralisation, de l'azote organique apporté par le fumier. Une autre possibilité est l'amélioration de la réserve en eau utile dans le sol (tabl. 12). L'influence de ce dernier facteur devrait alors surtout se faire sentir dans des différences de production en herbe entre printemps secs et humides.

En l'absence de données à ce sujet, un dédoublement a été effectué pour contrôler cette influence dans les années 1928 à 1959, la précipitation moyenne de 157 mm de toute cette période servant comme critère de différentiation entre printemps secs ou humides (tabl. 13).

TABLEAU 13

Rendements de la première coupe du traitement au fumier en pourcentage de ceux du traitement NPK pour les printemps secs ou humides de la période 1928-1959

Période	Précipitations (1)					
	< 157 mm		157 mm		< 157 mm	> 157 mm
	rendement relatif	nombre d'observation	rendement relatif	nombre d'observation	précipitations moyennes (mm)	
1928-1934	88	4	97	3	138	188
1935-1941	107	5	108	2	132	231
1942-1948	108	5	106	1	116	160 (2)
1949-1955	99	3	101	4	128	194
1956-1962	127	3	110	4	126	187
1963-1969	—	0	107	7	—	215

(1) Somme moyenne des précipitations de février à juin, dans la période 1928-1959.
(2) 1945 exclus, la fumure étant apportée après la première coupe.

Comme il résulte du tableau 13, l'action du fumier ne différa pas beaucoup entre les printemps plutôt secs et ceux plutôt humides. Il est donc raisonnable de supposer que l'amélioration de l'action du fumier au cours de l'expérience doit être imputée en majeure partie à la minéralisation de l'azote organique du fumier. Les arguments suivants plaident également en faveur de cette hypothèse :

— En 1945, la fumure sur tous les traitements fertilisés ne fut appliquée qu'après la première coupe, qui ne disposait donc que de l'arrière-effet des fumures des années précédentes. Le traitement fumier procura alors un rendement de 68 p. 100 supérieur à celui obtenu avec NPK, et cette augmentation fut de 28 p. 100 pour la combinaison 1/2 NPK + 1/2 fumier.

— Jusqu'en 1956, la seconde coupe d'herbe ne reçut pas de fumure. Après cette date, la fumure azotée sur les traitements aux engrais minéraux devint la règle. Le tableau 6 montre que la même évolution dans l'action du fumier par rapport au traitement NPK, visible dans la figure 2, peut être suivie dans les rendements de la seconde coupe jusqu'en 1956. Après cette date, cette différence disparut en raison des fumures azotées appliquées à la seconde coupe aux traitements minéraux (NPK et 1/2 NPK + 1/2 fumier).

Les teneurs en azote de l'herbe (tabl. 7) et du sol (tabl. 10) sont autant d'indications en faveur d'un apport supplémentaire d'azote assimilable par le fumier grâce à la minéralisation graduelle de la réserve d'azote organique accumulée par celui-ci au cours de l'expérimentation.

S'il fallait avec quelque réserve exprimer l'action du fumier en équivalents d'azote minéral, 100 kg d'azote du fumier équivaudraient à 40 kg d'azote minéral sous forme de sulfate d'ammoniaque, dans la période 1935-1941. A la fin de l'expé-

rience, les 100 kg d'azote du fumier produisirent en moyenne 10 p. 100 de plus de matière sèche que 50 kg d'azote minéral sous forme d'ammonitrate (fig. 2). Par rapport au traitement PK, les 50 kg d'azote minéral ont produit, en moyenne, pour les deux dernières périodes :
(6 101 + 5 362) : 2 — (4 120 — 4 481) : 2 = 1 431 kg supplémentaires de matière sèche (tabl. 5), soit 28,6 kg par unité d'azote utilisé. Avec un rendement moyen du traitement fumier de 10 p. 100 plus élevé par rapport au traitement NPK durant les deux dernières périodes (fig. 2), il y eut une production supplémentaire de 573 kg de matière sèche. Pour pouvoir réaliser cette augmentation, il aurait donc fallu 573 : 28,6 = 20 kg d'azote assimilable. L'effet des 100 kg d'azote du fumier équivaudraient alors à 50 kg d'azote minéral plus 20 kg d'azote minéralisé de provenance organique soit 70 kg d'azote minéral au total sous forme d'ammonitrate.

Au début de l'expérience, l'effet de l'azote du fumier était à peu près nul, d'après un calcul semblable, à moins que cet effet n'ait été masqué par l'approvisionnement insuffisant en phosphate et potasse, insuffisance qui persista du reste jusqu'à la fin de l'expérience, tandis que l'action du fumier s'améliorait quand même progressivement. L'efficacité de l'azote du fumier aurait donc aussi bien pu être d'environ 20 p. 100, comme elle fut mesurée ailleurs (KOLENBRANDER et DE LA LANDE CREMER, 1967).

Une efficacité de 70 p. 100 pour l'azote du fumier appliqué annuellement au printemps pendant une période suffisamment longue doit à peu près être le maximum réalisable avec utilisation sur prairie si l'on prend en considération les pertes inévitables par voie gazeuse et lessivage.

Pour la combinaison 1/2 NPK + 1/2 fumier, les rendements évoluèrent dès la quatrième période (1921-1927) à peu près parallèlement à ceux du traitement au fumier, en étant toutefois en moyenne légèrement supérieurs à ceux-ci dans les dernières 28 années. Au début de l'expérience, l'évolution était plutôt parallèle à celle du traitement NPK avec un rendement quelque peu inférieur.

La production en matière sèche du traitement PK diminua depuis la période 1914-1920 et se stabilisa à la fin de l'expérience à quelque 70 p. 100 de celle du traitement NPK.

Les teneurs en protéines brutes digestibles et en azote de la matière sèche (tabl. 7) confirment l'hypothèse déjà exprimée que le traitement au fumier disposa progressivement de plus d'azote assimilable pour l'herbe. La teneur passablement élevée des témoins doit probablement être attribuée à la très maigre production d'herbe sur ces parcelles.

La teneur en P_2O_5 en 1969 indique un approvisionnement en phosphore plutôt suffisant malgré les réserves insuffisantes du traitement au fumier (tabl. 10).

La teneur en potasse était loin d'être optimale pour une bonne production d'herbe (tabl. 7).

L'approvisionnement en magnésie est bon avec des teneurs en MgO remarquablement élevées dans l'herbe du traitement au fumier (tabl. 7).

La *qualité botanique du gazon* du témoin était fort mauvaise (tabl. 9). Digne de mention est la présence de quelques *Orchis maculatus* L sur ces parcelles. La qualité du gazon des autres traitements évolua de satisfaisante vers insuffisante pour les deux traitements aux engrais minéraux et de satisfaisante vers médiocre pour les deux traitements au fumier (tabl. 9).

La présence, entre autres, de passablement d'*Anthoxantum odoratum* L. (NPK = 54 p. 100 contre 20 p. 100 avec le traitement au fumier) est un indice que la fertilité du sol sur le traitement aux engrais minéraux a diminué plus sévèrement que sur le traitement fumier.

Le sol du témoin est devenu acide (tabl. 10). Sa teneur assez élevée en humus par comparaison aux autres traitements découle de la présence de débris organiques non dégradés dans ce milieu acide, formant une couche feutrée de 4 à 5 cm d'épaisseur, absente sur les autres traitements. Les teneurs en azote total des témoins également assez élevées par rapport à celles des autres traitements n'ont ici aucune incidence sur la croissance de l'herbe.

Les valeurs du pH des autres traitements sont marginales pour une bonne production herbagère. Dans les traitements aux engrais minéraux, ils s'élevèrent en profondeur ; dans le traitement au fumier, par contre il y eut un abaissement.

La couche de 0 à 20 cm du traitement fumier contient plus d'humus que les autres traitements fertilisés. La réserve en azote y est également plus élevée, provoquant probablement l'amélioration de l'effet azoté du fumier déjà signalé. Cette réserve plus élevée d'humus améliora également la réserve en eau utile à la végétation (= différence entre vol. d'eau (p. 100) à pF_2 et pF_4) (tabl. 12) par rapport au témoin (+ 27 mm) et au traitement NPK (+ 16 mm). Comme il a été déjà démontré ci-dessus, cette réserve supplémentaire n'eut cependant pas d'influence sur la production herbagère au cours des printemps plutôt secs (tabl. 13).

La valeur P-AL (tabl. 10) indique une réserve en phosphate insuffisante pour le traitement au fumier. Pour les autres traitements, cette réserve est suffisante à élevée. Par rapport à la valeur P-AL, la valeur Pw du traitement au fumier est curieusement élevée.

Les teneurs en potasse du sol sont basses pour tous les traitements sauf PK. L'apport en potasse ne satisfait qu'à peu près la moitié des besoins d'une bonne production herbagère. Les teneurs en potasse de l'herbe (tabl. 7) reflètent d'ailleurs l'insuffisance en cet élément.

La teneur en magnésie pour les traitements NPK et fumier est suffisante et, pour les autres, assez basse (tabl. 10). L'apport en magnésie faite au traitement NPK et rendu égal ces dernières années à celui amené par le fumier, est insuffisant pour la teneur en magnésie de ce sol.

La capacité de fixation pour les bases du sol du traitement fumier s'est quelque peu améliorée par rapport à celles des traitements aux engrais minéraux (tabl. 11). Il y a une bonne concordance entre les degrés de saturation en bases et les pH-H_2O mesurés.

IX. — CONCLUSIONS

Bien que l'apport en éléments nutritifs fait par le fumier de bovins utilisé à la dose de 20 t/ha/an, lui ait été défavorable par rapport au traitement NPK, l'effet du fumier a progressé peu à peu au cours d'une période d'expérimentation de 70 années. Cette amélioration de l'effet doit être attribuée en grande partie, sinon totalement, à une cumulation de l'action directe et des arrière-effets de l'azote du fumier,

ceux-ci provenant de la minéralisation de l'azote organique accumulé progressivement au cours des années. L'effet de l'azote du fumier a évolué de ce fait de 0 ou ± 20 p. 100 au départ de l'expérience à ± 70 p. 100 à la fin de celle-ci.

Reçu pour publication en mai 1976.

SUMMARY

MINERAL AND ORGANIC FERTILIZER EXPERIMENT ON PERMANENT GRASSLAND. ISLAND OF AMELAND (1899-1969)

A very simple fertilizer experiment was set up in 1899 and continued until 1969 on permanent grassland grown on sandy, originally maritime soil in the island of Ameland, located along the Frisian Coast in the Netherlands.

This experiment was initially aimed at promoting the use of artificial fertilizer. Following treatments were compared with unmanured plots : yearly application of 20 tons farmyard manure per ha, complete mineral fertilizer treatment (NPK), mineral fertilizers without nitrogen (PK) and a treatment including half of the amounts of farmyard manure and half of the complete mineral fertilizer treatment.

At the beginning, the amounts of nutrients brought into the soil through farmyard manure and mineral fertilizers were not equal, the former bringing lower amounts of phosphates and potash.

In spite of this flaw, this experiment gave us some very striking informations, owing to its long duration.

It appeared, for instance, that although less nutrients were supplied to the plots through farmyard manure (tab. 4), grass production on these plots became in the long run as high as on the plots fertilized with complete mineral fertilizer treatment, and ever higher. Accordingly, a yearly application of 20 tons of farmyard manure per ha which at the start resulted only in 80 p. 100 of the average production obtained with NPK mineral fertilizers, gradually increased grass production up to 110 p. 100 of the NPK treatment at the end of the experiment (fig. 2). These results could have been explained by a reduction in the grass production of the NPK treated plots, but no such reduction took place ; on the contrary the NPK treated plots received increasing amounts of inorganic nitrogen (tab. 1).

The surprising effect of farmyard manure must be mainly, if not entirely, due to an increase in the humus content of soil and to the resulting release, through mineralization, of the organic nitrogen supplied by farmyard manure, the cumulated after-effects of wich were added to its direct action during the first year of application.

The increase in the humus reserves also caused more available water in the soil : their level was 16 mm higher in the farmyard manure plots than in the plots treated with mineral fertilizers (tab. 12). However, it appeared that this difference did not play a leading part in the noted improvement of grass production on the plots treated with farmyard manure (tab. 13).

The efficiency of farmyard manure nitrogen appeared to be negligible at the beginning of the experiment, probably as a consequence of unsufficient amounts of phosphates and potash added through the treatment. These applications were not modified and even higher amounts of mineral N were added through the NPK treatment. Nevertheless, the efficiency of farmyard manure nitrogen increased, owing to the after-effects due to the mineralization of organic nitrogen which amounted to 70 p. 100 of mineral nitrogen (*i. e.* 100 kg of farmyard manure are equivalent to 70 kg of mineral nitrogen in the form of ammonium nitrate).

During the experiment, some important fluctuations appeared in grass production (fig. 1). During the same periods, changes had also been introduced, as far as the added nitrogen compound is concerned (fig. 1). However the form of the nitrogen compound cannot explain these fluctuations, which must rather be due to climatological factors (fig. 1).

Complete mineral fertilizer treatment applied during 70 consecutive years did not lead to a reduction in grass production. The application of farmyard manure alone or in combination with other mineral fertilizers eventually resulted in yields 10 p. 100 higher than yields obtained with complete mineral fertilization treatment (NPK).

The botanical quality of the sward (tab. 9) decreased during the last thirty years, particulary as a result of mineral fertilization. Acidification of the soil in the unmanured plot took place at the end of the experiment, and a felt-like mat (4-5 cm in thickness) was formed as a result of slow degradation of organic matter. Occasional plants of *Orchis maculatus* L. were established on it.

ZUSAMMENFASSUNG

EXPERIMENTELLE MINERALISCHE UND ORGANISCHE DÜNGUNG AUF NATURWIESE. AMELAND INSEL (1899-1969)

Ein sehr einfacher Düngungsversuch wurde im Jahre 1899 auf einer Dauerwiese auf dem seestammenden Sandboden der Ameland Insel aufgestellt und bis 1969 fortgesetzt, die vor der friesischen Küste der Niederlande liegt.

Dieser Versuch war ursprünglich für die Beförderung der Anwendung von Kunstdüngern bestimmt. Die folgenden Behandlungen wurden mit den der ungedüngten Parzellen verglichen : Jährliche Zufuhr von 20 Tonnen Rindmist pro Ha, vollständige Mineraldüngung (NPK), Mineraldüngung ohne Stickstoffzufuhr (PK) und eine aus der Hälfte der Mistgaben und der Hälfte der vollständigen Mineraldüngung bestehende Düngung.

Am Anfang wurde die Zufuhr von Nährstoffen für die Behandlung mit Mist und Mineraldüngern nicht ausgeglichen ; die erste ist was die Phosphat- und Kaligaben betrifft benachteiligt.

Trotz dieser schwachen Seite in der Untersuchung lieferte dieser Versuch einige ziemlich bedeutenden Angaben dank seiner langen Dauer.

Es erwies sich zum Beispiel dass die Mistdüngung trotz einer nachteiligen Nährstoffversorgung (tafel 4) auf die Dauer einen gleichen oder selbst höheren Grasertrag als die vollständige Mineraldüngung ergab. Der mit 20 Tonnen Mist pro Ha und pro Jahr erzielte Ertrag, der am Anfang des Versuchs nur umgefähr 80 p. 100 des mit als Mineraldünger verabreichte NPK-Düngung erzielten Ertrags erreichte, gelangte allmählich 110 p. 100 desselben am Ende des Versuchs (Abb 2) Diese Tatsache konnte durch eine Verminderung des Grasertrags nach NPK-Zufuhr erklärt werden, doch zeigte dieser keinen Rückgang ; die NPK gedüngte Parzelle erhielt übrigens eine steigende Mineralstickstoffgabe (tafel 1).

Diese erstaunliche Mistwirkung soll einer Steigerung des Humusgehalts im Boden und der nachfolgenden durch Mineralisierung bedingten Befreiung des mit Mist verabreichten organischen Stickstoffs grösstenteils wenn nicht ganz zugeschrieben werden, deren kumulierte Nachwirkungen zu der direkten Wirkung dieses am ersten Jahr hinzukommen.

Die Zunahme Der Humusreserve hatte auch eine Zunahme der Bodenreserve in nutzbares Wasser zur Folge, die auf der mistbehandelten Parzelle 16 mm höher als die auf der mit Mineraldüngern behandelten Parzelle (tafel 12) war. Es erwies sich doch dass dieser Unterschied keine wichtige Rolle in die beobachtete Ertragsverbesserung des ersten Grasschnitts auf der mistbehandelten Parzelle (tafel 13) spielte.

Am Anfang des Versuchs schien die Wirksamkeit des Miststickstoffs unwesentlich vermutlich in Folge einer unzureichenden Zufuhr von Phosphat und Kali. Diese Zufuhr wurde nicht geändert und die Zufuhr von Mineralstickstoff auf die NPK gedüngte Parzelle wurde sogar gesteigert. Die Wirksamkeit des Miststickstoffs nahm trotzdem dank der Nachwirkungen der Mineralisierung des organischen Stickstoffs zu, die zu 70 p. 100 des Mineralstickstoffs entspricht (*d. h* dass 100 kg Miststickstoff gleichen 70 kg als Kalkammonsalpeter verabreichter Mineralstickstoff).

Während des Versuchs äusserten sich einige ziemlich beträchtlichen Schwankungen was die Grasertragshöhe betrifft (abb. 1). Die betreffenden Perioden überlappen sich mit den Zeitabschnitten, wo es auch eine Änderung der gebrauchten Form von Mineralstickstoff gab (abb. 1). Die Stickstofform konnte doch nicht diese Schwankungen verursachen, die vielmehr durch Klimaeffekte bedingt sein sollten (abb. 1).

Die vollständige Mineraldüngung während 70 aufeinanderfolgenden Jahre hat nicht die Ertragshöhe der Wiese vermindert. Die Anwendung von Mist allein oder in Kombination mit Mineraldüngern hat zum Schluss zu einer Ertragshöhe geführt, die 10 p. 100 höher als die mit der vollständigen Mineraldüngung (NPK) erzielte Ertragshöhe ist.

Die botanische Rasenbeschaffenheit (tafel 9) senkte während der 30 letzten Jahre insbesondere unter dem Einfluss der Mineraldüngung. Der ungedüngte Kontrollboden wurde am Ende des Versuchs sauer und zeigte eine 4-5 cm dicke verfilzte Schicht in Folge eines herabgesetzten Abbaus der organischen Abfälle. Dort wuchsen vereinzelte *Orchis maculatus* L.

РЕЗЮМЕ

Опыт минерального и органического удобрения природного луга-остров Амеланд (1899-1969).

Л. К. Н. ЛЕ ЛА ЛАНД КРЕМЕР (при техническом сотрудничестве Л. Ван дер Веен).

Очень простой опыт удобрения постоянного луга, на песчанной приморской почве острова Амеланд, расположенного против фризонского побережья Голландии, был заложен в 1899 году и длился до 1969.

Начальным заданием этого опыта было распространение применения искуственных удобрений. Результаты полученные на неудобренных делянках сравнивались с результатами следующих обработок : ежегодное внесение 20 тонн/га коровьего навоза, полное минеральное удобрение N PK, минеральное удобрение без азота (PK) и удобрение состоявшее из половины указанной дозы навоза и половинной дозы полного минерального удобрения.

Вначале, количества питательных элементов внесенные с навозом и с минеральными удобрениями, были неодинаковыми, ибо навоз содержал мало фосфора и калия. Несмотря на существование в эксперименте этого « слабого » пункта, опыт дал, благодаря своей длительности, некоторые весьма интересные результаты.

Оказалось, например, что несмотря на недостаток питательных элементов в навозе (таблица 4), обработка лугов этим последним позволяла достичь, и даже превысить продукцию травы, полученную после длительного применения полного минерального удобрения. Продукция, полученная после внесения 20-ти тонн навоза/га в год, представлявшая в начале опыта в среднем около 80 % продукции полученной на участках где было внесено полное минеральное удобрение NPK, прогрессивно увеличивалась и представляла к концу опыта 110 % (рис. 2). Явление это можно было-бы об' яснить уменьшением продукции травы в варианте NPK, но в этом последнем случае никакого уменьшения не наблюдалось, тем более, что в этом варианте происходило увеличение запасов азота в почве (таблица 1).

Это необычайное действие навоза можно частично, или даже полностью, приписать увеличению содержания гумуса в почве, и освобождению, с помощью его минерализации, органического азота принесенного с навозом, сумма последействий которого, прибавляется к прямому действию элемента в первый год внесения.

Увеличение запасов гумуса в почве вызывает увеличение полезного запаса влаги, который, в случае обработки навозом, превышает на 16 мм количество влаги, найденное в почве после внесения минерального удобрения (таблица 12). Однако, ока залось что эта разница не играет никакой роли в отмеченном увеличении урожая травы первого по внесении навоза укоса (таблица 13).

Эффективность азота навоза казалась ничтожной в начале опыта, повидимому в виду недостаточности содержания в нем фосфора и калия.

Количество этих элементов в навозе не было увеличено, и, напротив, процент минерального азота был увеличен в варианте обработки NPK. И, несмотря на это, эффективность азота навоза продолжала расти, благодаря последействиям вызванным минерализацией органического азота, соответсвовавшей 70 % минерального азота (это означает что 100 кг азота навоза эквивалентны 70 кг минерального азота внесенного в виде нитрата аммония).

Уровень продукции травы сильно изменялся в течении опыта (рис. 1) и периоды этих изменений соответствовали эпохам изменения применявшихся форм минерального азота (рис. 1). И вместе с тем. форма азота не могла быть сама по себе причиной этих изменений, вызывавшихся скорее всего климатическими факторами (рис. 1).

Полное минеральное удобрение в течении 70-ти лет не понизило уровня продукции луга. Применение-же одного только навоза, или навоза в комбинации с минеральным удобрением, превысило, в конце концов, на 10 % уровень полученный при применении полного минерального удобрения NPK.

Ботаническое качество травы (таблица 9) ухудшилось за последние 30 лет опыта, особенно под влиянием минерального удобрения. Реакция почвы контрольной неудобренной делянки, стала кислой к концу опыта и замедление деградации органических остатков вызвало образование на ней войлочнообразного слоя в 4-5 см толщины, на котором спорадически произростало небольшое количество *Orchis maculata* L.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

KOLENBRANDER G. J., DE LA LANDE CREMER L. C. N., 1967. Stalmest en gier. *Waarde en mogelijkheden*, 188 pages, Veenman, Wageningen.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 1027-1042.

LONG-TERM GRASSLAND EXPERIMENTS AT COCKLE PARK

P. W. ARNOLD, F. HUNTER and P. GONZALEZ FERNANDEZ *

Department of Soil Science,
University of Newcastle upon Tyne,
N E 1 7 RU (England)

SUMMARY

The paper describes three long-term grassland experiments started at the end of the 19th century in North East England on infertile clay loam. Both the Tree Field Experiment and the Hanging Leaves Experiment involved the use of manures and fertilisers on grazed land and the results were assessed in terms of animal live-weight gain. On the low phosphorus status soil, basic slag produced good economic returns. The grazing experiments were terminated in 1954. The third experiment, Palace Leas meadow hay trial was started in 1897 to assess the effect of farmyard manure and fertilisers on the yield and quality of hay. Yields of hay are low by modern standards and there are major differences in botanical composition among plots.

Much interest centres on the way in which the treatments have affected the soil. Data on physical and chemical properties of the soils are supplied, with special reference to the distribution of inorganic and organic P in the surface soil (0-15 cm) and the distribution of total P with depth down to 38 cm. There is evidence that amounts of P have been reduced in the subsoils, even where the plots have received considerable annual applications of phosphorus since 1897.

The three long term grassland experiments referred to in this paper are sited in North East England at Cockle Park Experimental Farm on heavy land which is naturally infertile and poorly drained. The farm is 30 km north of Newcastle upon Tyne and 10 km from the east coast, at a mean altitude of 90 m above sea level. Rainfall is usually evenly distributed throughout the year, ranging from about 700 to 750 mm per annum, for example, over the period 1956-62 it was 742 mm ; over the same period the mean annual temperature was 8°C with 1386 hours of sunshine per annum.

The soil parent material at the sites is reddish brown (10 YR 4/3) boulder till of variable thickness (average 6-9 m), slightly calcareous at depth and typical of the clay loam textured Upper Boulder Clay of the area. On some parts of the sites grey Lower Boulder Clay may occur below a thin cover of Upper Boulder Clay but the textures of the two materials are similar. Surface soils contain more than 27 p. 100

* New adress : C.R.I.D.A. de Andalucia, Cordoba, Spain.

clay and about 20 p. 100 silt (2-20 μm) and subsoils contain between 35 and 42 p. 100 clay with silt contents of up to 25 p. 100.

Towards the end of the last century there was much poor grassland in North East England and experiments using manures and fertilisers to improve its output were started. Two of the experiments were concerned with grassland for grazing (Tree Field (1897-1954) and Hanging Leaves (1903-1954)) and one, which still continues, is concerned with the production and quality of hay from permanent grassland (Palace Leas meadow hay experiment (1897-).

GRASSLAND FOR GRAZING — TREE FIELD (1897-1954) AND HANGING LEAVES (1903-1954)

The Tree Field Experiment was started in 1897 by Sir William Somerville with the objective of using the grazing animal to assess the response of poor grassland to manures and fertilisers.

Because the live weight gain of grazing sheep was used to measure the productivity, the trial is often referred to as the « manuring for mutton experiment ». The field was divided into 10 plots of 1.23 ha with 1.21 ha constituting the main plot and 0.02 ha being used to measure hay production over the years until 1920. The manurial treatments shown table 1 ran in six year cycles, starting in 1897 and ending in 1954. Some of the plots did not receive constant treatment, for example plot 2 received 10 tons ha^{-1} lime in 1897 and 1903 and then received the same treatment as plot 4 until 1936 when ground mineral phosphate replaced basic slag.

TABLE I

Summary of treatments applied to Tree Field Experiment (1897-1954)

Plot	Treatment
1	336 kg ha^{-1} high protein concentrate fed to sheep annually during the first 3 years of each 6 year cycle.
2	Ground mineral phosphate every 3rd year ; 49 kg P ha^{-1} (initially a limed plot 10 tons CaO ha^{-1} in 1897 and 1903).
3	Basic slag every 6th year ; 98 kg P ha^{-1}.
4	Basic slag every 3rd year ; 49 kg P ha^{-1}.
5	Superphosphate every 3rd year ; 49 kg P ha^{-1}.
6	No treatment.
7	Basic slag as for plot 4 plus 112 kg KCl ha^{-1} every 3rd year.
8	Basic slag as for plot 4 plus 2.5 tons $CaCO_3$ ha^{-1} every 3rd year
9	Basic slag as for plot 4 plus 126 kg $NaNO_3$ ha^{-1} every 3 rd year.
10	Dissolved bones every 3rd year ; 49 kg P ha^{-1}.

(Plot 2 received P as basic slag until 1936 ; Plots 7, 8 and 9 received superphosphate in place of basic slag until 1906 — for summary of these and other variations in treatments see PAWSON (1960)).

The plots were grazed for a standard period each year. From 1897-1929 and from 1947-1954 sheep between one and two years old were used, however, between 1930-1946 the grazing pattern was complicated by using ewes and lambs. The grazing period was usually 14 weeks, extending from mid-May until mid-August with no attempt to start grazing when a particular plot was ready for the animals. At the end of the summer all the grazing animals were removed from the experiment on the same day. The number of animals allocated to each plot was decided at the beginning of the season entirely on the basis of previous experience. When plots needed grazing in the winter, cattle were usually brought in but sheep were sometimes reintroduced. The mean live-weight gains from summer grazing are given in table 2. Even though the liveweight gains are small by present standards the results did much to encourage the use of phosphate, particularly basic slag, on grassland.

TABLE 2

Tree Field Experiment.
Mean live-weight gains per annum from summer grazing only (1897-1954)
Estimates of starch equivalent production * per annum including winter grazing for 1897-1929 and 1930-1946

Plot No.	Live weight gain per annum 1897-1954 (kg ha^{-1})	Starch equivalent production per annum, including winter grazing	
		1897-1929 (kg ha^{-1})	1930-1944 (kg ha^{-1})
1	137	916	1 293
2	148	803	1 557
3	158	1 067	1 569
4	157	979	1 557
5	150	954	1 544
6	43	427	665
7	148	954	1 544
8	152	991	1 494
9	143	941	1 557
10	137	916	1 519

(* Starch equivalent × 9,87 = net energy MJ)

The original aim was to examine the economics of the trial involving the costs of treatments and the value of the product (mutton) and the conclusions were expressed in monetary terms which could be understood by all. With sward improvement the summer stocking rates were increased and live-weight production on treated plots was about four times that of the control. At the beginning the heavier applications of basic slag, given every sixth year, were appreciably more effective than the same over-all dressings applied more frequently, but the initial advantage was not maintained. It was also found that feeding high protein concentrates to animals was an expensive way of improving the fertility and output of grazed pas-

tures. ROSCOE and BROCKMAN (1960) examined some of the deficiencies of the trial, particularly the fact that no value was given to the winter grazing. They concluded that the results from Tree Field were considerably influenced by the method of experimentation, principally the rate of stocking. At an early stage of the trial, Somerville suggested that predetermined stocking rates and timing could contribute towards low returns, for example, the benefits of applying nitrogen to plot 9 were underestimated as the early growth was wasted. ROSCOE and BROCKMAN (1960), using a standard conversion factor for putting a value on winter grazing (so many grazing days being equated to maintenance rations), reassessed the results of the Tree Field trial in terms of Starch Equivalent production, as illustrated in table 2 for the years 1897-1929 and 1930-44. These authors point out that the data for 1930-46, based on starch equivalents of production, reflect a change in summer stocking policy which included sheep and lambs, leading to increased production over summer stocking with sheep. These workers stressed that the results from the Tree Field experiment were greatly influenced by the rate of stocking, which was to a large extent pre-determined. Herbage taken from the small mown sub-plots was used to provide estimates of protein production and P uptake data, some of which have been discussed in detail by PAWSON (1960).

Soils taken from Tree Field trial in 1949 were examined for phosphate reserves by ROY and THOMAS (1951) who drew up P balance sheets for several plots and accounted for up to 98 p. 100 of the unused phosphate in the surface 20 cm of soil. They also measured the P status through pot experiments using *Rapanus sativa* L. as a test crop. It was concluded that the residues from the basic slag were superior to those from superphosphate on the particular type of soil, subsequently confirmed by ROSCOE (1960) by field experimentation after the grazing trial was terminated in 1954. The yields of oat grain (table 3) and wheat grain grown after the old plots

TABLE 3

Yields of oats grown on Tree Field Plots in 1956 (after ROSCOE, 1960)

	Plot number and original treatment					
	4 Slag every 3rd year	5 Super every 3rd year	6 No treatment	7 As for plot 4 + KCl	8 As for plot 4 + lime	9 As for plot 4 + $NaNO_3$
pH (0-7.5 cm)	5.6	5.6	5.4	6.2	7.5	6.4
pH (7.5-15 cm)	5.9	5.3	5.6	6.0	7.5	6.4
Treatment 1956 only	Oats (kg ha^{-1})	Oats (kg ha^{-1})	Oats (kg ha^{-1})	Oats (kg ha^{-1})	Oats (kg ha^{-1})	Oats (kg ha^{-1})
None	3 691	2 875	741	3 427	4 079	3 564
N	4 256	3 991	1 330	4 229	4 493	3 489
P	3 955	3 252	1 482	3 139	3 614	3 878
K	3 338	3 037	1 230	3 288	3 677	3 514
Ca	3 577	2 987	1 406	2 999	3 727	3 978
NPK Ca	4 869	4 116	2 711	4 129	4 141	4 066

had been ploughed showed the value of the phosphate residues in soils to succeeding crops, the superiority of slag residues over those from superphosphate and, above all, the low yields obtained on exhausted land (Plot 6) despite the application of reasonable levels of NPK and Ca for the spring sown cereal.

The Hanging Leaves grazing trial was started in 1903 on land adjacent to Tree Field on similar unimproved pasture. According to PAWSON (1960) there is little doubt that MIDDLETON, who initiated the trial, based the main treatments on the excellent results obtained on Plot 3 of the Tree Field trial. Four large plots of 4.05 ha were established on pasture, most of which had been drained in 1897.

The treatments received by the large plots were as follows :

Plot 1. 98 kg P ha^{-1} as basic slag in 1903 and 49 kg P ha^{-1} as basic slag in 1906 and every third year ;

Plot 2. Basic slag as for Plot 1 plus 377 kg ha^{-1} cotton cake (or its equivalent) fed annually from 1904 ;

Plot 3. 98 kg P ha^{-1} as basic slag in 1903 only and cotton cake as for Plot 2 ;

Plot 4. 98 kg P ha^{-1} as basic slag in 1903, 39 kg P ha^{-1} as basic slag plus, 440 kg ha^{-1} fish meal (manure) in 1906 and every third year.

It has been suggested that the large plots were used to answer critics who felt that Tree Field plots were too small to manage on a farm scale. Also there was a need to test treatments under normal mixed stocking rather than with sheep. The lessons emerging from the early years of the experiment were simple but of great economic importance at the time.

The Hanging Leaves trial confirmed the findings of Tree Field that basic-slag was the most economic and effective treatment for pasture. Most of the advantages came through the vigorous growth of wild white clover (Trifolium repens). At the time the most important aspect of the trial was the clear evidence that phosphorus supplied as basic slag removed the main obstacle to pasture improvement on the particular soil. There is no doubt that the slag not only corrected the acute phosphorus deficiency but also offset removals of calcium. With soil pH values stabilised around 5.5, adequate P and a satisfactory K status, clover flourished and an active cycling of nutrients ensued under grazing conditions. Stocking with sheep and cattle resulted in about double the production obtained from comparable plots on Tree Field stocked with sheep. As described in detail by PAWSON (1960), plot 3 reverted to its original poor condition when cake feeding was relied on to maintain the initial improvement brought about by the slag. It is interesting to note that PAWSON also refers to the improvement in the surface drainage conditions as a result of slag application. This may arise partly from greater transpiration arising from increased plant growth but some of the effects related to decreasing soil bulk-densities, like those measured on Palace Leas plots (see fig. 1), probably occurred when the plots received adequate applications of basic slag. The live-weight gains, involving cattle and sheep, on each plot in 1904 were : plot 1, 183 kg ha^{-1} ; plot 2, 235 kg ha^{-1} ; plot 3, 228 kg ha^{-1} and plot 4, 192 kg ha^{-1}. At that time the main point of interest in the trial lay not with the differences in the live-weight increases but with the low cost effectiveness of the basic slag.

GRASSLAND FOR MOWING — PALACE LEAS MEADOW HAY PLOTS (1897-)

The objective of the Palace Leas meadow hay experiment was to examine the effects of farmyard manure and fertilisers on the yield and quality of hay. Sixteen non-replicated 0.2025 ha plots were established by SOMERVILLE in the autumn of 1896 on permanent grassland. The plots were reduced in size to 0.121 ha in 1919, but the continuity of the treatments on plots 1 to 13 has been preserved up to the pre-

TABLE 4

Summary of treatments applied to Palace Leas Meadow Hay Plots (1897-)

Plot	FYM (t ha^{-1})	$(NH_4)_2SO_4$ (kg ha^{-1})	$NaNO_3$ (kg ha^{-1})	Basic slag (kg ha^{-1})	KCl (kg ha^{-1})	Total application kg ha^{-1}		
						N	P	K
1	20	42	56	168	56	118	42 (1)	111
2	20					100	29 (1)	83
3	20 every 2nd yr.	42	56	168	56	100/18 (1 : 1)	29/13 (1 : 1)	83/27 (1 : 1)
		alternate years to FYM						
4	20 every 2nd yr.					100	29	83
						alternate years only		
5	40 every 4th yr.	42	56	168	56	200/18 (1 : 3)	58/13 (1 : 3)	83/27 (1 : 3)
		applied in 3 out of 4 years						
6		unmanured						
7		168				35		
8				336			26	
9					112			56
10		168		336		35	26	
11		168			112	35		56
12				336	112		26	56
13		168		336	112	35	26	56
14		478		370	166	100	29	83

(1) Under-estimated, see text p. 1040.

sent time with the exception that superphosphate alternated with basic slag from 1897-1906. A single hay crop, dried on the plots, is removed each year and the aftermath is grazed using both sheep and cattle. After 1954, plots 14, 15 and 16 were discontinued, however, plot 14 was re-established in 1974 with inorganic NPK supposedly equivalent to NPK applied to plot 2 in the form of farmyard manure (FYM). The FYM is traditionally applied in November and the P and K in February and N fertiliser in March. As shown in table 4, FYM is applied annually to plots 1 and 2 and on plots 3 and 4 it is applied in alternate years and to plot 5 every fourth year. Inorganic fertilisers are applied in various ways along with the FYM on plots 1, 3 and 5. Apart from the untreated plot 6, the others, 7-13, receive one of the following inorganic treatments : — N, P, K, NP, NK, PK, NPK.

TABLE 5

Hay dry matter mean yields per annum from Palace Leas plots over 79 years (1897-1975)

Plot	Dry matter — mean yield (1897-1975) kg ha^{-1}
1	5 772
2	5 345
3	5 174
4	4 235
5	4 406
6	2 080
7	2 528
8	2 859
9	1 909
10	3 456
11	2 400
12	3 189
13	3 659
14	5 312

The mean dry matter yields of hay over the entire period of the trial are given in table 5. It is important to realise that after hay removal the aftermath was grazed in late summer and autumn without any restriction on the movement of animals. This free movement of animals must inevitably cause some redistribution of nutrients among plots and may partly explain why the moving average yield of the unmanured plot has not changed over more than seventy years. This unrestricted grazing has obvious disadvantages, as when attempting to draw up a nutrient balance sheet for any plot. Nevertheless, the management was regarded as in accord with farming practice when the experiment started.

As shown in table 5, over the history of the experiment the treatment which has had the largest influence on dry matter yield has been the farmyard manure. Plot 2 with annual dressings of FYM has averaged 5 345 kg dry matter ha^{-1} per annum compared to the control plot with 2 080 kg ha^{-1} ; FYM supplemented by N, P and K yielded 5 772 kg ha^{-1}. As might be expected on a soil rather well supplied

with potassium in the form of illitic clay, KCl has had little influence on yield, indeed when used alone (plot 9) it depressed yield to a mean of 1 909 kg ha^{-1} which is below that of the untreated plot. Similarly the differences between the yields of dry matter obtained from the NP and NPK plots (10 and 13) was rather small, confirming the small influence of K.

One of the original aims of the experiment was to measure the effects of fertiliser and manurial treatments on the quality of the hay and a considerable amount of data was collected on this topic. Among the main findings, as given by ELLIOTT and THOMAS (1934) and THOMAS *et al.* (1955 *a* and *b*), the unmanured plot 6 has maintained a steady high percentage of protein in the hay, considerably higher than in that from plots 1 and 2. The largest crude protein percentage was often found in the hay from plot 12, but this differed little from the values for plots 7 and 11. In accounting for such data, THOMAS *et al.*, suggested that the immaturity of the hay on certain plots accounted for the trends, however, it is difficult to establish whether this factor or the species difference was the major factor influencing quality.

The *botanical compositions* of most of the plots are very different from each other. With between 10 and 23 species represented on the various plots it is not easy

TABLE 6

Percentage dry weight of plant species (aerial tissue) *harvested from some Palace Leas plots in late June 1973*

Amounts < 5 p. 100 of total are recorded ; t indicates trace amount
(By courtesy of Dr. J. H. OLLERENSHAW)

Species	Plot number and treatment									
	1 FYM and NPK	2 FYM	6 NONE	7 N	8 P	9 K	10 NP	11 NK	12 PK	13 NPK
Alopecurus pratensis ..	28	28	54							
Anthriscus sylvestris ..	26	19								
Dactylis glomerata	14	6	19					18		18
Poa trivialis	12	19								
Lolium perenne	11	22	14					12		
Bromus mollis	7									
Anthoxanthum odoratum				7	28	10	10	5	28	
Rumex acetosa							11			
Festuca rubra				36	38	7	31	9	50	
Agrostis tenuis				24	23	7	25	7	13	
Plantago lanceolata ...				24		28	17	10		13
Rhinanthus minor						21				5
Holcus Lanatus								17		5
Trisetum flavescens ...								8		5
Festuca ovina					6				9	
Ranunculus species ...										6
Trifolium repens	t	t				7	t	t		5
Trifolium pratense	t	t					t	5		21

to summarise the botanical information. Taking the percentage dry weight of aerial tissue where this exceeds 5 p. 100 of the total, the principal species at hay harvest in late June 1973 are listed in table 6. Information about the presence of Trifolium species in the harvested material is also included even where the amount is < 5 p. 100. It is perhaps surprising that Trifolium species were absent in the hay from plots 8 (P) and 12 (PK) which traditionally are both known to favour a sufficiently vigorous growth of clover to fix appreciable nitrogen. There is no doubt that a conventional botanical analysis of the sward is needed to supplement information in table 6. Most of the main trends which stand out in table 6 and are reasonably consistent, for example, *Festuca rubra* is stimulated by N and P both singly and together, but not by K or K and N together. *Anthoxanthum odoratum* responds to P and PK but not to N alone, nor to N in the presence of P or K. It is difficult to understand why *Lolium perenne*, along with *Dactylis glomerata* are quite strongly represented on the acid plot 11, further-more it is surprising that *Trifolium pratense* should survive on this plot. The clear break in the dominant species is remarkable in moving from the FYM and unmanured plots to those receiving mineral fertilisers only.

The long-continued treatments have greatly influenced *the physical and chemical properties of the soils* and *the distribution of some elements within the profiles.*

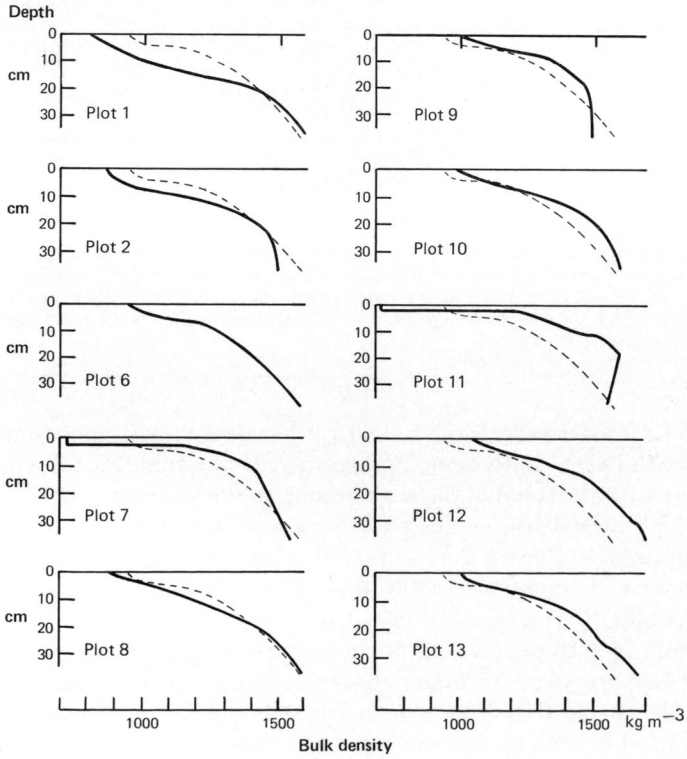


FIG. 1. — *Dry bulk densities of soils from Palace Leas plots, 0-38 cm*
(Broken line refers to untreated plot)

BARRATT (1967) examined the humus forms in the Palace Leas soils and calculated that different surface manurial treatments, acting largely through their effect on the pH and soil organism activity, induce the development of specific humus forms with very different horizon macro fabrics. Recent bulk density measurements on one representative profile (0-38 cm) from 10 separate plots are summarised in figure 1. For ease of comparison the bulk densities of the untreated Plot 6 are drawn (broken line) on each diagram and it can be seen that Plots 1 and 2, receiving farmyard manure, and Plot 8, receiving basic slag alone, are considerably less dense than Plot 6 down to about 20 cm. The highest bulk densities were found on Plots 7 and 11, receiving N and NK, respectively. Plots 12 and 13 showed a very similar trend of increasing density with depth, both being appreciably denser than Plot 8 which receives P alone. In line with the trend of the N alone and, to some extent, the K alone treated plot, to give high bulk densities, the trend shown by Plot 13 is not unexpected, but Plot 12 is appreciably denser than expected when compared with other plots. It would be interesting to check the earthworm activity in Plot 12 in relation to Plots 1, 2 and, in particular, 8. There is clear visual evidence that the drainage of the surface soils varies from plot to plot, which is not surprising when it is realised that bulk densities at 15 cm are 50 p. 100 larger on some plots compared with others.

TABLE 7

Chemical data on some soils from Palace Leas Plots sampled 0-15 cm in November 1973

Plot	pH (H_2O)	pH 0.01 Mol $CaCl_2$ dm^{-3}	Milli-équiv./100 g soil (2)				Organic C (%)	µg P g^{-1} soil			Org. C / Org. P
			Ca	Mg	K	Na		Total	Inorg.	Org.	
1	5.9	5.2	17.1	3.2	1.15	1.64	5.77	2 002	1 541	461	125
2	5.6	5.0	13.8	3.4	0.97	1.16	5.76	1 757	1 251	506	114
6	5.0	4.1	6.3	1.1	0.40	0.81	3.98	502	227	275	145
7 (1)	4.2	3.6	2.6	0.4	0.16	0.46	3.04	423	228	195	156
8	5.8	5.1	14.9	1.9	0.26	0.75	3.83	859	484	375	102
9	4.9	4.1	5.1	1.1	1.09	0.71	3.92	573	220	313	125
10	5.2	4.6	13.0	1.5	0.28	0.65	4.14	918	555	363	114
11 (1)	4.2	3.6	3.6	0.5	0.39	0.26	3.43	454	224	230	149
12	5.7	5.0	14.8	1.6	0.36	0.85	4.09	888	528	360	114
13	5.2	4.6	12.6	1.5	0.40	0.78	4.18	1 062	665	397	105

(1) Surface organic mat, approximately 3 cm, not included in 0-15 cm soil sample.

(2) Exchangeable cations determined by soaking overnight 5 g soil with 4 cm^3 distilled water, followed by 6 × 40 cm^3 neutral 1.0 mol dm^{-3} ammonium acetate, each addition shaken for 30 minutes and separated by centrifuging. Cations determined in combinated centrifugates made to 250 cm^3 by standard atomic absorption/emission procedures.

Some of the chemical and physico-chemical differences in the soils arising from the long-continued treatments are summarized in table 7. All the data were obtained from 0-15 cm soil samples collected in November 1973. The particular samples were bulked 1.8 cm diameter cores taken from 60 points in the second quarter of all plots

(excluding 3, 4, 5 and 14) transversing south-west to north-east across the experimental area. The pH values of the 0-15 cm soil samples in water and 0.01 mol $CaCl_2$ dm^{-3} accord with the well-known effects of some of the treatments, such as the acidification caused by the application of ammonium sulphate, the slight additional acidification caused by KCl, and the ' liming effect ' arising from the basic slag. The range of pH (H_2O) in the surface soils was from 5.9 on plots 1 and 8 to 4.3 on plots 7 and 11, excluding the organic mats on the latter. Exchangeable calcium ranges from 17 to 2.6 meq/100 g on plots 1 and 7, respectively, and exchangeable magnesium spans the range 3.4 meq/100 g on plot 2 down to 0.4 on plot 7. From table 7 is seen

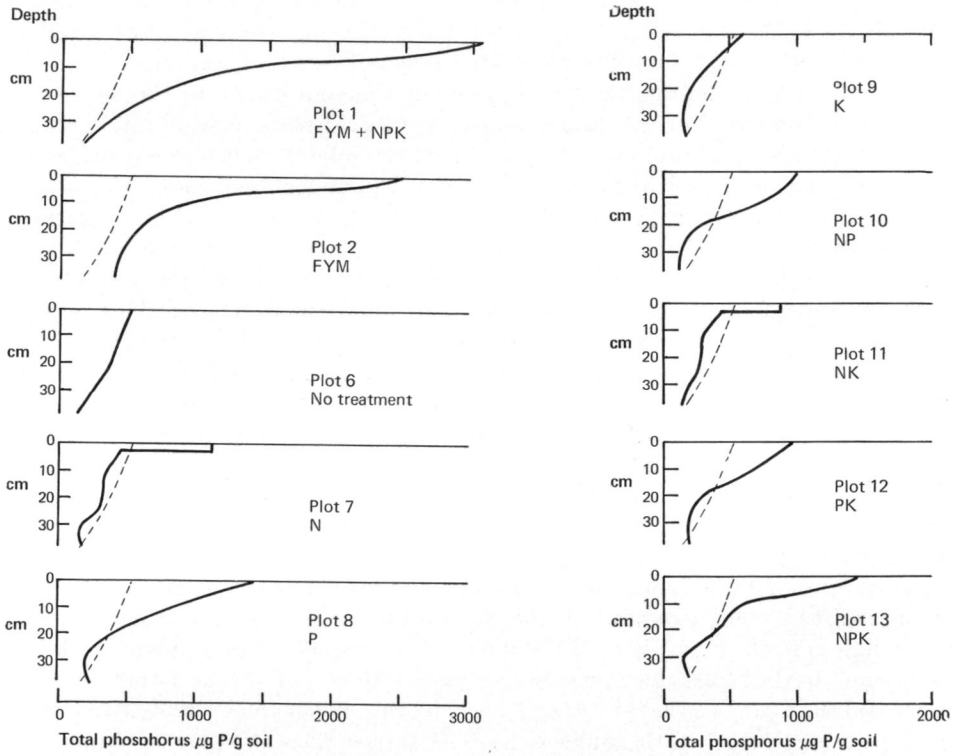


FIG. 2. — *Total phosphorus contents* (µg P/g soil) *of some Palace Leas plots, 0-38 cm*
(Broken line refers to untreated plot)

that whereas for the KCl treated plot 9 the exchangeable K stood at 1.09 meq/100 g, the amount in the NK treated soil was only 0.39 meq/100 g. As expected there is clear evidence in the soil analyses that basic slag is a useful source of calcium (ca. 30 p. 100 Ca) and, depending on the calcium/magnesium ratio, can be a significant source of magnesium. The latter point is reflected in the exchangeable Ca and Mg contents of soils from plots receiving slag with and without other inorganic fertilisers. The calcium and magnesium supplied by the basic slag came near to off-setting the acidifying effects of ammonium sulphate as seen in the levels of exchangeable Ca and Mg for plots 8 (P) and 10 (NP) which stand, respectively, at 14.9 and 13.0 for Ca and at 1.9 and 1.5 for Mg.

As shown in table 7, the organic carbon contents determined by the method of TINSLEY (1950) range from about 3 to nearly 5.8 p. 100 in the 0-15 cm horizon. Apart from plots 7 and 11, which have become very acid and contain relatively low organic carbon contents, there is little difference in any of the other plots receiving solely inorganic or no treatment. The FYM treated plots contain at least 40 p. 100 more organic carbon than the average of plots not receiving such treatment. Total phosphorus contents of the soils determined by the method of SOMMERS and NELSON (1972) are also recorded on a weight basis along with the amount in organic form (MEHTA *et al.*, 1954, and JOHN, 1970). In plots 6, 9 and 11 more than half the total P in the soil is organically combined. The weight ratios of organic carbon to organic phosphorus in the soils range between 102 and 156, being widest in plots 7 and 11, the N and NK treated plots. The wide ratios may indicate that shortage of available phosphate could be limiting the humus accumulation and it may be significant that raw humus is present on the surface of both these acid plots. A wide ratio was also obtained on the untreated plot 6 suggesting that under P deficient conditions the maximum ratio of organic C to organic P is near 145 under conditions which are not acid enough to cause the surface accumulation of mor humus. Lavish treatment of the soil with P or NPK reduces the organic C to organic P ratio to near 100.

Figure 2 summarises total P analyses done on the soil samples taken on a single 0-38 cm profile basis per plot. The organic mats approximately 3 cm thick on plots 7 and 11 were included in the samples, which was not the case for the 0-15 cm composite core samples. From the phosphorus contents of the soils and the bulk densities (fig. 1), a tentative balance for P in plots 1, 2 and 6 to 13 was obtained. The relevant data in kg P ha^{-1}, obtained by graphical integration of the phosphorus contents, μg P per g soil, and bulk densities, both on a horizon by horizon basis, are recorded in table 8, line (*a*). An estimate of the P removed in the hay over 76 years is recorded in line (*b*) of table 8, and line (*c*) gives the sum of (*a*) + (*b*). The best estimates of the amounts of P added over 76 years are recorded in line (*d*) ; there is not much uncertainty about the inorganic P additions but FYM is very variable in both its P and moisture contents and it is difficult to estimate how much P it has supplied. According to PAWSON (1960) the FYM was originally supposed to supply 22 kg P ha^{-1} per annum to the plots which received 20 tons FYM ha^{-1} each year. Other estimates suggested the figure was near to 29 kg P ha^{-1} and this higher value was used in table 8, giving 2 200 kg P ha^{-1} as the addition from FYM over 76 years. Line (*e*) obtained by subtracting (*d*) from (*c*) gave an estimate of the original P content of the plots down to a depth of 38 cm. As seen in line (*e*) the plots 6 to 13 inclusive fall into two groups, namely, those receiving P applications which averaged 1244 and those not receiving P which averaged 1943 kg P ha^{-1}. It is most unlikely that the two groups of plots should separate fortuitously and it is suggested that the unrestricted grazing of the aftermath has resulted in an appreciable transfer of P from P-treated to untreated plots. As a guide it is suggested that in the group of eight plots, 6 to 13 inclusive, the four P-treated plots have lost about 350 kg P ha^{-1} over the 76 years and the 4 plots not receiving P have gained this amount. If this suggestion is correct, the average P content of the plots 6 to 13 down to 38 cm was 1 593 kg P ha^{-1} in 1897. If the plots 1 and 2 contained this same average P content in 1897, then the average P addition through FYM to plots 1 and 2 would be about 3 300 and not 2 200 kg P ha^{-1} as entered in table 8. From this it is concluded that the FYM has on average supplied

TABLE 8

Tentative total phosphorus balance in some Palace Leas soil profiles sampled 0-38 cm (kg P ha^{-1})

Phosphorus (kg P ha^{-1})	Plot number and treatment									
	1 FYM and NPK	2 FYM	6 NONE	7 N	8 P	9 K	10 NP	11 NK	12 PK	13 NPK
(*a*) Total P (1974) 0-38 cm	4 432	3 923	1 795	1 696	2 651	1 511	2 433	1 664	2 340	2 457
(*b*) P removed in hay (76 years)	1 233	1 153	273	312	619	236	698	285	642	732
(*c*) = (*a*) + (*b*)	5 665	5 076	2 068	2 008	3 270	1 747	3 131	1 949	2 982	3 189
(*d*) P added over 76 years	3 150 (1)	2 200 (1)	0	0	1 900	0	1 900	0	1 900	1 900
(*e*) = (*c*) — (*d*)	2 515	2 876	2 068	2 008	1 370	1 747	1 231	1 949	1 082	1 289
			Mean = 1593							
(*f*) Estimated gain /loss by animal transfer	?	?	— 350	— 350	+ 350	— 350	+ 350	— 350	+ 350	+ 350
(*g*) Estimated total P in 1897 (0-38 cm)	—	—	1 718	1 658	1 720	1 397	1 581	1 599	1 432	1 639

(1) Based on estimated P content of FYM providing 29 kg P ha^{-1} annually.

50 p. 100 more P than is shown in table 8. If the FYM contained about 25 p. 100 dry matter, the P content would have to be near 0.9 p. 100 as is often found in samples of high quality FYM ; only on this basis can the present day compositions of plots 1 and 2 be accounted for unless, of course, they started at high levels.

If the estimate of a transfer of about 350 kg P ha^{-1} from high P to low P plots is correct, then the grazing animals here transferred about 4.5 kg P ha^{-1} per annum from P-treated to untreated plots. This estimate of animal transfer is based on the assumption that P redistribution on plots 1 to 5 did not interfere with the gains and losses over plots 6 to 13. Any refinements to the calculations are probably unjustified for several reasons including the fact that casual observations indicate that resting animals prefer to congregate on plots 7 and 11 which carry surface organic mats (comfort factor!) ; such a tendency would lead to extra accumulation of P on these plots, but this cannot be verified.

The analytical data summarised in fig 2 show that on plots 1 and 2 there has been an accumulation of P relative to the untreated plot 6 down to at least 38 cm. In the other profiles there has, however, been a reduction in the P content of the subsoil relative to plot 6 ; in every case the addition of nutrients, including P, to the surface, has led to a reduction in the P content of the soil below about 20 or 25 cm. Admittedly, much rests with the reliability of the data, particularly for plot 6, obtained on one representative profile per plot, but comparing the results for other plots such as 8 and 10 it is evident that added N on plot 10 led to greater depletion of P below about 20 cm. Viewed in these terms, not only does fertiliser P fail to penetrate beyond about 25 cm (ROY and THOMAS, 1951) on this soil but surface application of P and other nutrients leads to a bringing up of phosphorus from the subsoil, due to stimulated root activity and greater plant growth.

As the one remaining long term grassland experiment at Cockle Park enters its 80th year it is appropriate to remember that even before their 8th year (MIDDLETON, 1905) the experiments produced results which had far reaching agronomic effects. The main effect arose directly from the response of clover to water-insoluble phosphate fertiliser, however, the plots have more than justified their existence as sources of botanical, nutrient cycling and soil physical information which only becomes apparent as cumulative effects. With supplies of basic slag rapidly disappearing, due to changes in the steel industry, the Palace Leas plots will inevitably have to receive another form of P fertiliser in the near future. Despite this change there seems to be a good case for continuing their general management along traditional lines.

Reçu pour publication en mai 1976.

RÉSUMÉ

EXPÉRIENCES DE LONGUE DURÉE SUR PÂTURAGES A COCKLE PARK

Cet exposé décrit trois expériences de longue durée entreprises sur des pâturages en terre argilo-limoneuse peu fertile, dans le nord-est de l'Angleterre, vers la fin du XIXe siècle. Les expériences « Tree Field » et « Hanging Leaves » (noms des exploitations) concernaient l'application

de fumier et d'engrais sur les pâturages ; on a exprimé les résultats en gain de poids vif des animaux. En terre pauvre en phosphore, l'addition de scories a entraîné de bons rendements économiques ; on a mis fin aux expériences de pâturages en 1954. On a entrepris la troisième expérience à « Palace Leas » en 1897, afin d'évaluer les effets du fumier et des engrais sur la production et sur la qualité du foin. Les rendements sont bas, si on les compare aux rendements actuels ; de plus, il y a de grandes différences entre parcelles au plan de la composition botanique.

On a porté beaucoup d'intérêt à la façon dont les traitements ont affecté le sol. Le texte fournit des données sur les propriétés physiques et chimiques des sols, et plus particulièrement sur la répartition du phosphore (P) organique et inorganique dans le sol en surface (0-15 cm) et sur celle du phosphore total jusqu'à 38 cm de profondeur. On constate ainsi que les quantités de phosphore ont diminué dans les sous-sols, et ce, même lorsque les parcelles ont reçu de considérables applications annuelles de phosphore depuis 1897.

ZUSAMMENFASSUNG

DAUERVERSUCH AUF WEIDEWIESEN IN COCKLE PARK (ENGLAND)

In diesem Studium werden drei Dauerversuche beschrieben, die auf Weidewiesen (toniger lehmboden) am Ende des 19 en Jahrhunderts im Nord-Osten Englands eingerichtet worden waren. In beiden Versuchen, « Tree Field » und « Hanging Leaves », wurden Stallmist und Handelsdünger zu den Weidewiesen gegeben. Die Ergebnisse wurden als Gewinn an Lebendgewicht des Viehes ausgedrückt. Auf phosphorarme Böden konnten durch Zufuhr von Thomasmehl gute Erträge erreicht werden. Die Versuche auf Weidewiesen wurden in 1954 beendet. Der dritte Versuch, « Palace Leas » Wiesenheuversuch, wurde in 1897 angelegt, um die Wirkung von Stallmist und Handelsdüngern auf Heuertrag und Heuqualität zu erforschen. Auf jetzige Erträge bezogen, waren die Heuerträge niedrig und beachtliche Unterschiede wurden zwischen der botanischen Zusammensetzung der verschiedenen Parzellen registriert.

Die Auswirkungen der Behandlungen auf den Boden wurden mit besonderem Interesse verfolgt. Daten über dir physikalishen und chemischen Bodeneigenschaften, unter besondere Berücksichtigung der Verteilung von inorganischem und organischem Phosphor in der obersten Bodenschicht (0-15 cm) und von allen Phosphoren bis zu 38 cm Tiefe, werden ermittelt. Eine Abnahme der Phosphormenge konnte im Unterboden festgestellt werden, auch wenn jährlich seit 1897 höhe Gaben an Phosphor den Parzellen zugeführt worden waren.

РЕЗЮМЕ

Долгосрочные опыты на пастбищах Кокль Парк.

П. В. АРНОЛЬД, Ф. ХАНТЕР, П. ГОНЗАЛЕС-ФЕРНАНДЕС.

В данной работе описываются три долгосрочных опыта заложенных в конце 19-го века на пастбищах расположенных на глинистых почвах северо-востока Англии. Опыты эти « Три Фильд » и « Хангинг Ливс » (по названию хозяйств) состояли во внесении навоза и удобрений на пастбища; результаты рассчитывались на базе оценки прибыли полученной от увеличения полезного веса животных. В почвах бедных фосфором, внесение шлаков повлекло за собой увеличение рентабельности; опыты на пастбищах закончились в 1954. Третий опыт был предпринят в 1897 в хозяйстве « Палас Пис » чтобы оценить влияние навоза на продукцию и качество сена. Урожайность тогда была слабой по сравнению с теперешней; а кроме того существовала и разница между делянками, в смысле ботанического состава.

Много внимания уделялось действию обработок на почву. Приводятся данные о физических и химических свойствах почв, служивших для опытов, и в особенности, о распределении органического и неорганического фосфора в их поверхностном слое (0-15 см. глубины), и всех видов фосфора — до 38-ми сантиметров глубины. Доказывается что количества фосфора в под-почве чменьшались, даже тогда, когда делянки получали хорошее фосфорное удобрение с 1897-го года.

REFERENCES

BARRATT B. C., 1967. Differences in humus forms and their micro-fabrics induced by long-term top-dressings in hayfields. *Geoderma*, **1**, 209-227.

ELLIOTT F. J., THOMAS B., 1934. On the yields and composition of meadow hay from certain of the Palace Leas plots at Cockle Park. *J. agric. Sci. Camb.*, **24**, 379-389.

JOHN M. K., 1970. Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant material with ascorbic acid. *Soil Sci.*, **109**, 214-220.

MEHTA N. C., LEGG J. O., GORING C. A. I., BLACK C. A., 1954. Determination of organic phosphorus in Soils : I. Extraction Method. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18**, 443-449.

MIDDLETON T. H., 1905. The improvement of poor pastures. *J. agric. Sci.*, **1**, 122.

PAWSON H. C., 1960. *Cockle Park Farm : an account of the work of the Cockle Park Experimental Station from* 1896 *to* 1956. Oxford University Press.

ROSCOE B., 1960. The distribution and condition of soil phosphate under old permanent pasture. *Pl. Soil*, **12**, 17-29.

ROSCOE B., BROCKMAN J. S., 1960. A re-assessment of the Tree Field Experiment, Cockle Park, Northumberland. *J. br. Grassld. Soc.*, **15**, 150-154.

ROY B. B., THOMAS B., 1951. The phosphate reserves in some old permanent pasture plots. *Emp. J. exp. Agric.*, **19**, 175-184.

SOMMERS L. E., NELSON D. W., 1972. Determination of total phosphorus in soils : A rapid perchloric acid digestion procedure. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36**, 902-904.

THOMAS B., HOLMES W. B., CLAPPERTON J. L., 1955 *a*. A study of meadow hays from the Cockle Park plots. Part I. Proximate constituents and digestibility. *Emp. J. exp. Agric.*, **23**, 25-33.

THOMAS B., HOLMES W. B., CLAPPERTON J. L., 1955 *b*. A study of meadow hays from the Cockle Park plots. Part II. Ash Constituents. *Emp. J. exp. Agric.*, **23**, 101-108.

TINSLEY J., 1950. The determination of organic carbon in soils by dichromate mixtures. *4th int. Congr. Soil Sci.* (Amsterdam), **1**, 161-164.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6), 1043-1082.

MODERN DEVELOPMENTS IN AN EXPERIMENT ON PERMANENT GRASSLAND STARTED IN 1856 : EFFECTS OF FERTILISERS AND LIME ON BOTANICAL COMPOSITION AND CROP AND SOIL ANALYSES

JOAN M. THURSTON, E. D. WILLIAMS and A. E. JOHNSTON

Rothamsted Experimental Station,
Harpenden, Herts. AL 5 2 JQ
(England)

SUMMARY

Different combinations of fertilizers have been applied annually since 1856 to permanent grassland cut for hay each year, and their effects compared with those of farmyard manure and an unfertilised treatment. Three amounts of nitrogen as ammonium sulphate (48, 96 and 144 kg N ha^{-1}) and two as sodium nitrate (48 and 96 kg N ha^{-1}) are tested together with P K Na Mg but not all treatment combinations are included. P K Na Mg is also applied without N. Between 1903 and 1964 half-plots of most treatments were limed at 2 240 kg CaO ha^{-1} every fourth year. In 1965 a new liming scheme was introduced, eventually to produce soils at pH of 4, 5, 6, 7 on the four subplots of each treatment. Yields have been recorded annually and the herbage has been analysed botanically and chemically in some years. Occasional assessments have also been made of the pH and nutrient content of the soils. This paper describes results for 12 of the 20 plots and includes a brief summary of recent work on the ecological genetics of *Anthoxanthum odoratum* which occurs on most plots.

Yields of hay varied with treatment from the start of the experiment. Differences due to treatment were accentuated during the first sixty years even though yield on most plots declined. Then during 1920-1960 yields remained relatively stable, except with the smallest amount of ammonium sulphate, when yields continued to decline. The unmanured plot continued to yield little and the largest yield was with most nitrogen plus P K Na Mg. Where Where P K Na Mg was given with equivalent amounts of nitrogen, as sodium nitrate without lime, or as ammonium sulphate with lime, yields were the same. P K Na Mg alone and also farmyard manure alternating with fish meal gave a moderate yield. Since 1960 estimates of yield have been larger because they have been taken before, and not after, the losses incurred during hay-making. Yields were increased on previously-unlimed acid soils following liming between 1965 and 1968 ; extra lime on previously-limed soils had little effect.

The vegetation on unmanured soil is diverse, about 50 plant species equally distributed between grass and dicotyledons ; lime has only small effects on the botanical composition. Where P K Na Mg is given, diversity is maintained but legumes increased especially where lime is also given. Where ammonium sulphate has acidified the soil, the herbage is dominated by acid-tolerant grasses — either *Agrostis*, *Anthoxanthum* or *Holcus*, depending on the amount of N and other nutrients applied. Lime applied with the two larger amounts of ammonium sulphate allows more productive grasses like *Arrhenatherum* and *Alopecurus* to prevail. At equivalent rates of N,

sodium nitrate without lime produces a sward similar to ammonium sulphate with lime. Of great interest is the fact that the flora of many plots changes slowly despite unchanging fertiliser treatment. *Agrostis* or *Anthoxanthum*, now dominant on some plots, did not become so until the 1930*s* and 1950*s* respectively. The relative abundance of *Alopecurus* and *Arrhenatherum* has also fluctuated with time on many plots. Liming under the new scheme has caused large changes in botanical composition on previously unlimed acid soils ; acid-tolerant grasses have usually decreased, but without K, *Festuca* has increased greatly. *Holcus* has unexpectedly increased with 96 kg N ha^{-1} and decreased with 144 kg N ha^{-1}, but *Arrhenatherum* and other grasses have also increased. Occasional plants of many dicotyledonous species have established on the plots. Increased amounts of lime on previously limed soil have enabled *Arrhenatherum* to increase, mainly at the expense of *Alopecurus*. Studies of morphological and physiological variation in *Anthoxanthum* by Dr. SNAYDON *et al.* of Reading University, have shown population differentiation with respect to morphological characteristics and response to mineral nutrients. The differences have developed quickly and locally and appear adaptive.

The variation in percentage N in the different crops was small and the amounts of N removed by the crops on different plots were largely dependent on yield. Percentage P and percentage K in the crops were both much greater where they were applied than where they were not and the total uptake of both ranged widely. The crops contained little Na and this was decreased where K was applied. Percentage Mg decreased as yield increased and its uptake was greatest where K was not applied. Percentage Ca was largest in crops grown without manure and the amount removed was only slightly increased by lime. Herbage grown on acid soil contained little Mg and Ca.

The pH of the unmanured soils and those given P K Na Mg are now about 5. Those receiving sodium nitrate range from 6 to 7 but on all plots receiving ammonium sulphate the soils are very acid (pH 3.7-4.0). On soils receiving most ammonium sulphate much of the chalk applied since 1903 has been lost. Where chalk has been applied in the new scheme, changes in pH have been slow ; Ca appears to be held in the surface « mat » of partly decomposed organic matter. Percentage organic matter in the soil was largest in soil where ammonium sulphate was given but there was no more in soils given sodium nitrate than in unmanured soil. For most treatments, percentage N in soil varied little between 1913 and 1959 and an equilibrium value appears to have been reached. Residues of P have accumulated in the surface soil, and on soils with much organic matter, some has moved into the sub-soil. K residues have also accumulated where more has been applied than was removed by the crop.

Since 1965 a micro-plot experiment (sited on a plot given P K Na Mg from 1870 to 1963) has tested larger amounts of nitrogen and more frequent cutting than in the main experiment. Yields of herbage and recovery of N have been larger than in the main experiment and *Trifolium* species much encouraged.

INTRODUCTION

The Park Grass experiment on manuring grassland for hay was started in 1856 by LAWES and GILBERT on a level field at Rothamsted which had been in grass for longer than 100 years (LAWES and GILBERT, 1880). There was no record of the field being sown, but slight, regular undulations in part of it suggest that it was once ploughed in the ridge-and-furrow system. The soil is classified as Batcombe Series by the Soil Survey of England and Wales. It is a flinty silt loam or loam developed on Clay-with-flints overlying Upper Chalk. Probably because Park Grass has not been ploughed for so long the surface soil contains few flints. Complete agricultural and meteorological records for the duration of the experiment are available (see PENMAN, 1974, for a summary of Rothamsted weather).

Scope of this paper

It is impossible to discuss in detail the distribution of about 60 species which have been found on 20 plots during 120 years. We have therefore selected certain plots (table 2), and used the results from them to show botanical composition has

changed with changing soil reaction and impoverishment and enrichment of plant nutrients. These are all plots which have received unchanged treatments for about 100 years and only changes in the more abundant species are discussed.

TREATMENTS AND EXPERIMENTAL METHOD

Botanical nomenclature and units of measurement

The current Latin names for species occurring on the plots have changed, some of them several times, since this experiment began. In this paper we have followed CLAPHAM, TUTIN and WARBURG (1962). These names are not necessarily those of earlier publications *e. g. Helictotrichon pubescens* = *Avena pubescens* (table 7).

Similarly, plot-areas, fertiliser dressings and yields have been converted from the original imperial to the equivalent metric units, sometimes rounded up where this could be done without introducing gross errors. The conversion accounts for some apparently unusual quantities, all of which are per hectare, abbreviated ha^{-1}.

Fertilisers

The object of the experiment was to see how hay yields could be improved by applying fertilisers. Figure 1 shows a plan of the experiment and table 1 gives the treatments. Two plot-widths were used for the original series of plots, giving areas of 0.2 or 0.1 ha approx (1/2 or 1/4 acre). Because of the field boundary and the presence of three large oak trees within it, plots 1 to 3 and 14 to 17 (added in 1858), and 19 and 20 (added in 1872) were smaller than the others. Plot 18 was started in 1865. Two of the oak trees have now been removed.

LAWES and GILBERT replicated the unmanured plots, one at each end of the field (LAWES and GILBERT, 1859) but replication and randomisation of all treatments were still to come. However, figure 1 shows that the treatments in this experiment are arranged in a sequence which facilitates direct comparison and demonstration of the effects of including and omitting plant nutrients. LAWES and GILBERT also included two plots (plots 1 and 2) which received farmyard manure (F.Y.M.) every year. However, F.Y.M. residues soon began to accumulate on the surface, because incorporation into the soil was so slow ; yields were diminished and the treatment discontinued after eight years. It was not until 1905 that an F.Y.M. treatment was again introduced, this time on plot 13, and then F.Y.M. was applied once every four years (table 1).

Before 1856 LAWES and GILBERT had demonstrated convincingly that cereals would yield well if given annual dressings of fertiliser N. Because permanent grassland contained so many Gramineae the fertiliser treatments tested were divided into three main groups : No N, N at three rates as ammonium salts and N at two rates as sodium nitrate (from 1858). Within the three groups there were comparisons of O and P with and without K Na Mg (applied as their sulphates) for some of the rates of N. All fertilisers were applied each year ; P K Na Mg usually in late winter, nitrogen in spring.

Plot 11 (N_3 P K Na Mg) was halved in 1862 to test silicate (plot 11^2, fig. 1) in addition to the other fertilisers. Until 1872 equal weights of Ca and Na silicates were used after which it was all sodium silicate. Silicate was tested, in the hope that it would prevent lodging of crops given much N ; it did not do so. However, the silicate dressing raised soil pH where lime was also given (table 12) and this affected the yield and botanical composition of the hay.

Treatments were altered on several plots in the first few years of the experiment. Plots 5 and 6 originally tested ammonium sulphate which rapidly eliminated legumes from the sward. After 13 years the N dressing was replaced by three treatments, PK, PKNaMg and unmanured, to observe which would encourage the return of legumes. The legumes, eliminated within three years by the N dressing, took 40 years to return to their original amount where P and K were applied.

Table 2 shows the starting-dates of treatments discussed in this paper.

Liming

JOHNSTON and MATTINGLY (1976) have explained why the soils of Park Grass, unlike those on which arable experiments were made at Rothamsted, contained no free calcium carbonate when the experiment began and soon started to become more acid. Chalk at 2.8 t ha^{-1} was tested in 1881, on a narrow strip of plots 1 to 13, but there was no large effect on yield.

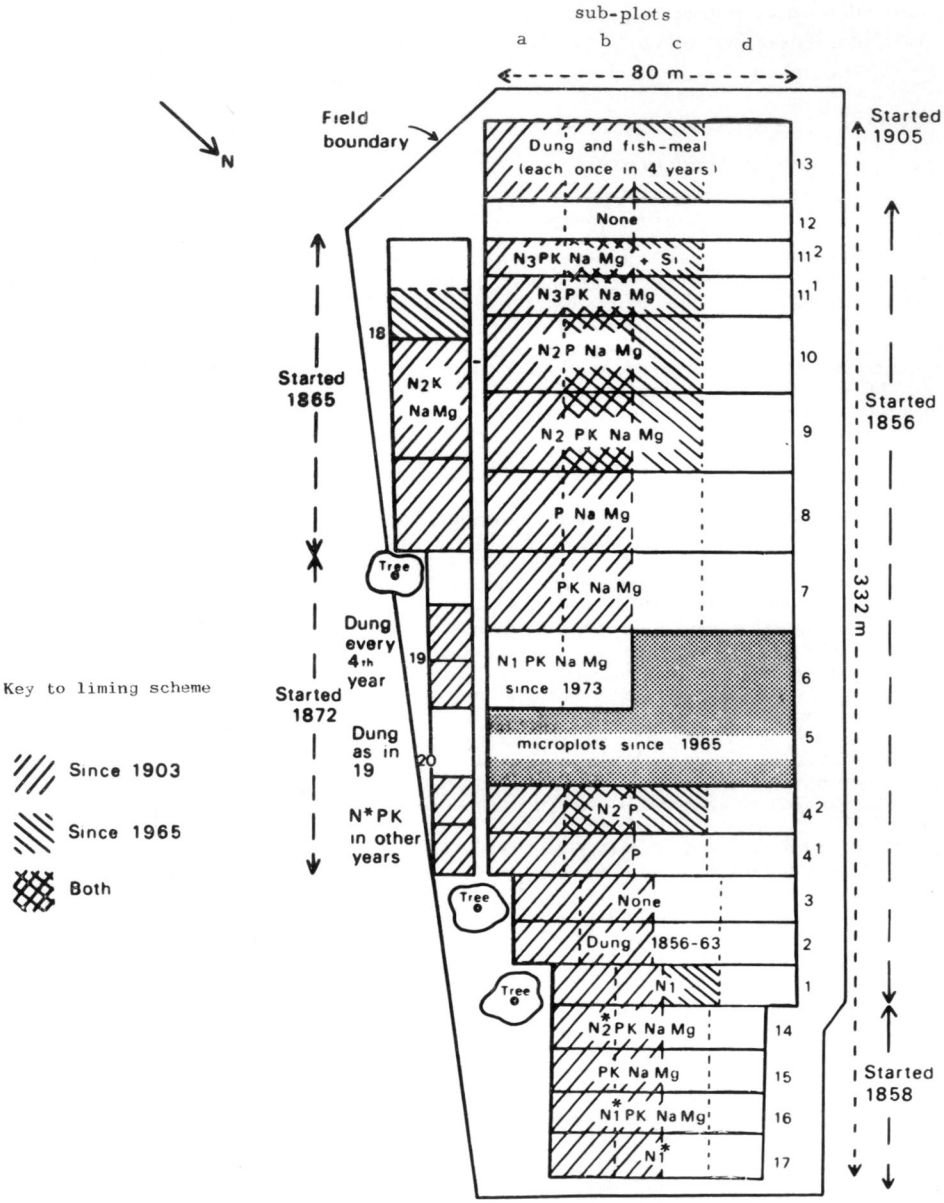


FIG. 1. — *Plan of the Park Grass experiment on manuring of grassland for hay*

Plot number		Area (approximate)
Largest e. g.	7 to 10	0.2 ha = 1/2 acre
Half plots e. g.	11^1, 4^1	0.1 ha = 1/4 acre
Smaller	14 to 17	0.07 ha = 1/6 acre
Smaller	19 and 20	0.05 ha = 1/8 acre

For amounts and dates of *lime* see text and tables 1 and 13.
For *fertiliser* amounts and changes see text and table 1.
For *soil pH* see text and table 12.
Dung = FYM = farmyard manure (table 1).

TABLE 1

Fertilisers and lime applied to Park Grass plots for at least 50 years to 1975
(Treatments given annually except as indicated)

Nitrogen applied in spring.

N 1, N 2, N 3 ammonium sulphate supplying 48, 96, 144 kg N per ha (= ha^{-1})
N 1*, N 2* sodium nitrate supplying 48, 96 kg N ha^{-1}
(Throughout this paper N = ammonium sulphate, N* = sodium nitrate)

PKNaMgSI applied in winter.

P 35 kg P ha^{-1} as powdered superphosphate
K 225 kg K ha^{-1} as potassium sulphate (50 p. 100 K_2O)
Na 15 kg Na ha^{-1} as sodium sulphate (14 p. 100 Na)
Mg 11 kg Mg ha^{-1} as magnesium sulphate (10 p. 100 Mg)
Si 450 kg ha^{-1} of water soluble powdered sodium silicate (to plot 11^2 only)
Plot 20 (in years when FYM not applied)
30 kg N, 15 kg P, 45 kg K ha^{-1}

Organic each applied every fourth year.

FYM 35 t ha^{-1} farmyard manure (bullocks) (1973, 1977)
Fish meal (about 6.5 p. 100 N) to supply 63 kg N ha^{-1} (1975, 1979)
about 950 kg ha^{-1} meal.

Lime

Started 1903 2 240 kg CaO ha^{-1} as slaked lime or finely ground $CaCO_3$
Started 1965 See table 13.

TABLE 2

Plots of the Park Grass experiment discussed in this paper

Plot number	Treatment	Unchanged since
	No nitrogen group	
3	Unmanured	1856
8	P Na Mg	1862 but amount of Na has varied
7	P K Na Mg	1856
	Ammonium-N group	
1	N_1	1863
10	N_2 P Na Mg	1862 but amounts of fertilisers have varied
9	N_2 P K Na Mg	1856
11^1	N_3 P K Na Mg	1881 received N_4 = 192 kg ha^{-1}
11^2	N_3 P K Na Mg Si	1881 1856-1881 except 1859-61
	Nitrate-N group	
17	N_1*	1858
16	N_1* P K Na Mg	1858
14	N_2* P K Na Mg	1858
	Organic	
13	Farmyard manure / Fish meal alternating at 2-year intervals	1905

In 1883-4, one half of each plot received 2.2 t CaO ha^{-1} as slaked lime and in 1887-8 the other halves were similarly treated. Plots receiving most ammonium sulphate were given twice as much lime. There was no immediate effect from the dressing applied in 1883 but during 1885-87 small benefits, 0.63-0.88 t hay ha^{-1}, were recorded on plots given NPK fertilisers. It was not until 1903 that a scheme of regular liming was gradually introduced. Since 1924 the south halves of most plots have been limed every 4th year at the equivalent of 2.24 t CaO ha^{-1}. In 1920, another scheme of liming testing two laboratory methods for measuring the lime requirement of soils was introduced on plots 18, 19 and 20 ; subsequently these dressings were repeated every 4th year.

By 1965 it was realised that some of the interactions between soil reaction and nutrients on the botanical composition of the sward could not be measured, and a new liming scheme was introduced (WARREN, JOHNSTON and COOKE, 1965). Each plot was divided into 4 sub-plots, 2 on the limed, 2 on the unlimed half plots ; it is intended that eventually the sub-plots will have soils with pH's of approximately 4.0, 5.0, 6.0 and 7.0 (in water) (fig. 1). Treatment started immediately on all sub-plots which had become sufficiently acid to require corrective liming (fig. 1, table 13) but even the unmanured plots are acidifying slowly and will eventually come into this scheme. This has provided the first opportunity in living memory for us to assess changes in the vegetation (WILLIAMS, 1974) as soil reaction has changed (JOHNSTON, 1972). These are the modern developments discussed in this paper.

Methods of harvesting, sampling and recording yields

a) *The first crop.*

This was always cut and made into hay on the plot on which it grew ; hay yields were recorded and samples were often taken for botanical and, less frequently, chemical analysis. Until 1873 the herbage was cut with a scythe, then with a mowing machine. Since 1960 yields were recorded as dry herbage calculated after determining the dry matter content of fresh herbage cut by a flail forage harvester from sample strips on each plot. Thus, total dry matter at cutting, not the dry matter after hay making, was recorded and yields have been larger since 1960 because dry matter losses due to hay-making no longer occur. After the sample cuts are taken the bulk of the herbage is mown and made into hay on its own plot as previously, thus continuing the annual supply of fresh seeds of the appropriate species. This is particularly important on plots with much *Holcus lanatus*, many old plants of which die in severe winters and are replaced by seedlings in spring.

There is no record of the nutritive value or palatability of the hay having been investigated, although LAWES and GILBERT were very interested in animal nutrition (LAWES and GILBERT, 1895)

b) *Second crop.*

In 15 years during 1856-75 the regrowth after the first cut was grazed by sheep, penned on each plot separately and given no other food. Notes were made on their grazing habits *e.g.* in 1868 they ate the fine grasses (*Festuca* etc. first, then *Dactylis glomerata*, but *Arrhenatherum elatius* was only tipped, not eaten right down. Legumes and « weedy herbage » were apparently eaten indiscriminately. Because of the difficulty of deciding what is a weed in the mixed flora of permanent grassland we now describe plants which are neither grasses nor legumes as « other species » (STAPLEDON, 1939). Some of these other species are palatable and even beneficial though low-yielding. The number of sheep and the length of time they grazed on each plot were recorded and equivalent hay yields were calculated approximately by assuming that one sheep would eat 7.26 kg of hay in one week. Because the sheep often suffered from the change from better food, or from bad weather, or both, grazing was discontinued (LAWES and GILBERT, 1880)

During the next eight seasons the herbage of the second crop, and third if any, was mown, spread and left to decay on its respective plot to simulate grazing. However, leaving a thick layer of vegetation on the more fertile plots resulted in patches of retarded growth and some dead plants in the sward. Since 1887 all of the second cut has been carted, weighed and yield given as hay, or since 1960 as herbage dry matter.

Hay samples, and observations on botanical composition of the growing crop

The numerical results on percentage composition of the hay were obtained by taking representative samples of fresh herbage from each plot immediately after cutting. Handfuls of fresh herbage were taken at regular intervals along the undisturbed windrows until a suitable volume of material was collected, brought to the laboratory and made into hay by drying and turning, care being taken to avoid excessive breakage or bleaching by strong sunlight (BRENCHLEY, 1924;

BRENCHLEY and WARINGTON, 1969). Since 1960, tedding the grass immediately after cutting has left it too fragmented for botanical analysis and in 1973 and 1974 samples were cut by hand from the standing crop bordering the forage-harvester strips ; these samples were made into hay as before.

Because neither LAWES nor GILBERT were botanists, they sought the temporary help of skilled botanists to train and supervise Rothamsted staff doing the hay separations. The first University-trained botanist joined the Rothamsted staff in 1906. However, sorting, identifying and weighing the species in hay samples is very time-consuming and cannot be done every year, so visual observations are made on the standing crop. Since 1920 notes have been made on every plot just before the first cut and again at some time during the autumn before the secont cut. In the early years of the experiment these botanical notes vary greatly in the amount of detail, depending on who did them.

Visual surveys showed that the new liming scheme, introduced in 1965, caused large changes in the botanical composition of many sub-plots. To quantify these changes more precisely, samples of hay were taken in 1973 and 1974 from all sub-plots (*i.e. a, b, c* and *d*) of plots which had received lime under the new scheme (fig. 1). In 1973 samples were taken from the *c* (limed for the first time) and *d* (permanently unlimed) sub-plots and in 1974 from the *a* (limed under the old scheme)and *b* (receiving increased rates of lime) sub-plots. Comparisons of the botanical compositions of sub-plots *a* and *d* in 1973-74 (table 8) with the limed and unlimed halves respectively of the same plots at the previous hay analysis in 1948-49 (table 7) assess the changes during 25 years on sub-plots with unchanged treatment. Comparisons of sub-plots *a* with *b* and of *c* with *d* assess changes due to the new liming scheme. Because these analyses showed large botanical changes in some of the plots with unchanged treatments, other plots *e.g.* unmanured, P K Na Mg and the sodium nitrate plots, also with unchanged lime and fertiliser treatments are now being analysed.

Soil-sampling

Few soil samples were taken in the early years of the experiment. LAWES and GILBERT appreciated that their conventional method of sampling, which removed a block of soil 15 × 15 cm by 23 cm deep at each sampling point, was not really suitable for sampling plots on permanent grassland because of the disturbance to the sward. So all plots were sampled only once, in 1876, though a few plots were sampled to 137 cm in 1870 when the water content of the soil was investigated after a severe drought. Recently soil sampling has been more frequent. Samples for chemical analysis are usually taken with a 2 cm diameter semi-cylinder sampling tool, which does not open up the closed sward of the plots. Cores required for the extraction of soil animals have to be larger, about 5 cm diameter.

Additional information on the flora and fauna

Members of departments other than Botany and Chemistry have used material from the Park Grass plots in their investigations. The presence of nitrifying bacteria in the soils, especially the relation of species to soil pH and to the presence of host-plants in the vegetation, has been discussed by NUTMAN and ROSS (1970). The invertebrate soil-fauna (EDWARDS and LOFTY, 1975), invertebrate surface fauna (EDWARDS, BUTLER and LOFTY, 1976), and earthworms (SATCHELL, 1955) have also been investigated. The number of soil invertebrates decreased with an increase in added nitrogen and a decrease in soil pH. The effects of fertilisers on surface-living anthropods are more indirect and much less distinct than on soil arthopods. Earthworms are most numerous on plots with the most plant-species, which in turn depends on fertiliser-treatment ; they avoid very acid plots. When moles invade the field, they make most mole-hills where worms are numerous and none on the acid plots.

Workers from outside Rothamsted also use plant material from the Park Grass plots (see below).

RESULTS

Yields

1856-1926. Table 3 shows that yields of hay differed from the start of the experiment due to treatments. During 1856-58 the yields without manure (plot 3), with P K Na Mg (plot 7), P K Na Mg plus 96 kg N ha^{-1} (plot 9) and P K Na Mg plus

TABLE 3

Mean yield of hay (t ha^{-1}) *on some Park Grass plots during 1856-65, 1886-95 and 1916-25*

Treatment	1856-65	1886-95	1916-25[a]
No nitrogen group			
Unmanured	2.84	2.11	1.49
[b] P Na Mg	4.22	2.07	2.32
P K Na Mg	4.26	3.40	3.44
Ammonium-N group			
[c] N_1	6.08	2.99	2.00
[b] N_2 P Na Mg	6.63	4.46	3.28
N_2 P K Na Mg	6.73	4.93	4.42
N_3 P K Na Mg	7.75	5.98	5.21
N_3 P K Na Mg Si	8.34	7.78	6.39
Nitrate-N group			
N_1*	4.31	3.39	3.16
N_2* P K Na Mg	6.67	5.72	6.89

(*a*) : unlimed half-plot only ;
(*b*) : also received K during 1856-61 ;
(*c*) : also received FYM during 1856-63.

192 kg N ha^{-1} (plot 11) were 2.9, 4.2, 7.5 and 8.0 t hay ha^{-1}. This effect of treatment on yield persisted during the first sixty years or so (LAWES and GILBERT, 1880 ; BRENCHLEY and WARINGTON, 1969) ; but during this time yields of many plots decreased, some more than others. The largest decrease was on the N_1 plot ; but yields also declined on the unmanured plot and on those which did not receive K fertiliser (plots 8 and 10) where the mean yield of hay during 1916-25 was about half what it had been during 1856-65. Decreases also occurred on plots given ammonium sulphate plus P K Na Mg and these were associated with decreasing soil pH and increasing dominance of less productive acid-tolerant grasses. The only treatment which continued to give the same yield was P K Na Mg with 96 kg N ha^{-1} as sodium nitrate. No treatments increased yields (table 3).

1920-1959. With the exception of the N_1 plot, total yields, first plus second crop, were relatively stable during 1920-59 (table 4). Manuring and liming remained unchanged and the depletion and enrichment of soil N, P and K no longer affected yield. But when considering treatment effects on yield during this period it must be remembered that the crops are not botanically identical. Because the plots were cut earlier in June during 1940-59 than during 1920-39 the contribution of the first crop to the total yield decreased during the second 20 years of this period. In general, the first crop contributed about 70 p. 100 of the total annual yield, except on the N_1 and N_3 P K Na Mg plots where it was about 60 p. 100. These two plots are dominated by *Agrostis* and *Holcus* respectively which make much growth late in the growing season.

TABLE 4

Mean annual yield of dry herbage (t ha^{-1})
on some of the Park Grass plots during 1920-59

Treatment	1st crop		2nd crop		Total	
	Unlimed	Limed	Unlimed	Limed	Unlimed	Limed
No nitrogen group						
Unmanured	1.03	1.22	0.45	0.41	1.48	1.63
P Na Mg	1.90	1.52	0.80	0.64	2.70	2.16
P K Na Mg	2.57	3.39	1.09	1.04	3.66	4.43
Ammonium-N group						
N_1	1.05	1.77	0.65	0.60	1.70	2.37
N_2 P Na Mg	2.11	3.57	0.93	0.89	3.04	4.46
N_2 P K Na Mg	3.39	4.58	1.28	1.05	4.67	5.63
N_3 P K Na Mg	3.40	5.26	2.15	1.47	5.55	6.73
N_3 P K Na Mg Si	4.27	5.55	2.11	1.84	6.38	7.39
Nitrate-N group						
N_1*	1.91	2.22	0.74	0.66	2.65	2.88
N_2* P K Na Mg	4.82	4.63	1.39	1.04	6.21	5.67
FYM and fish meal	3.48	3.30	1.24	1.12	4.72	4.42

The unmanured plot continued to yield least dry herbage ; P and Na plus Mg doubled yield, and adding K as well increased yield even more. Yield was greatly increased by nitrogen together with P K Na Mg. With 96 kg N ha^{-1} (N_2) sodium nitrate outyielded ammonium sulphate by 1.5 t ha^{-1} but this result is confounded with the effects of treatment on soil pH and botanical composition. F.Y.M. plus fish meal gave a moderate yield (4.7 t ha^{-1}). Lime greatly increased yield from soils treated with P K Na Mg and ammonium sulphate, but it had little effect on the unmanured soil or where sodium nitrate or F.Y.M. were given. Lime decreased yields with P Na Mg and N_2* P K Na Mg. In contrast to the unlimed halves of the plots, the yields with N_2 P K Na Mg and N_2* P K Na Mg with lime were similar.

1965-73. Yields of dry herbage in this period (table 5) were much larger than those during 1920-59, probably because dry matter yields were estimated before, and not after, losses incurred during hay-making. Yields without fertilisers and with P Na Mg, where the vegetation is short and difficult to make into hay, were almost twice as large, and those of most other treatments were almost 50 p. 100 greater during 1965-73 than during 1920-59 ; only the N_1 plot yielded less during the later years probably because of increasing soil acidity and depletion of P and K, especially P. Nevertheless, the pattern of differences between treatments has been maintained. The test of lime started in 1903 was continued on the *a* and *d* sub-plots. In contrast to its effect during 1920-59, lime decreased yield on the N^*_1 plot but increased that of the F.Y.M. plot during 1965-73.

TABLE 5

Mean annual yield of dry herbage (t ha^{-1}) *on some of the Park Grass plots during 1965-73*

Treatment	1st crop				2nd crop				Total			
	a	*b*	*c*	*d*	*a*	*b*	*c*	*d*	*a*	*b*	*c*	*d*
No nitrogen group												
Unmanured	1.93		1.53		1.35		1.44		3.28		2.97	
P Na Mg	2.28		2.80		1.85		2.30		4.13		5.10	
P K Na Mg	5.32		3.28		3.03		2.34		8.35		5.62	
Ammonium-N group												
N_1	1.91		1.46	0.87	1.52		0.69	0.66	3.43		2.15	1.53
N_2P Na Mg	4.33	4.59	4.27	3.15	1.78	1.60	1.35	1.46	6.11	6.20	5.62	4.61
N_2P K Na Mg	6.76	6.50	5.90	5.02	2.86	2.67	1.72	1.68	9.62	9.17	7.62	6.70
N_3P K Na Mg	7.17	6.99	7.30	4.69	3.24	2.61	2.70	3.26	10.41	9.60	10.00	7.95
N_3P K Na Mg Si	7.41	7.72	7.38	5.48	4.07	3.98	2.96	3.41	11.48	11.70	10.34	8.89
Nitrate-N group												
N_1^*	2.38		2.60		1.63		2.18		4.01		4.78	
N_2*P K Na Mg	5.69		6.14		2.27		3.04		7.96		9.19	
FYM and fish meal	4.74		4.99	4.32	3.94		3.46	3.08	8.68		8.45	7.40

In 1965, the unlimed halves of plots were split into sub-plots *c* (where the pH is being raised to 5.0) and *d* which continues to be unlimed ; the limed halves were split into *a* (limed under old scheme) and *b* (where the pH is being raised to 6.0). On those plots where differential liming has not yet started the means of *a* and *b* or *c* and *d* are given.

Lime, applied in the new test started in 1965, increased yields of the previously unlimed *c* sub-plots, mainly since 1968. The size of the increase depended on treatment. With N_1, the yield of *c* relative to *d* increased progressively from 6 p. 100 more in 1965 to 207 p. 100 more in 1973 ; with N_2 P K Na Mg and N_2 P Na Mg yields were 20-40 p. 100 greater on *c* than on *d* sub-plots. With N_3 P K Na Mg the effects of recent lime have been more variable : the mean increase during 1965-73 was due mainly to very large differences in yield (60-120 p. 100) in 1968 and 1969, when the *d* sub-plots yielded very little. In all comparisons the extra yield was due mainly to increase in the first crop, lime often decreased yield of *c* relative to *d* sub-plots of second crops.

Increased rates of lime on *b* sub-plots have had, as might be expected, less effect than on the previously unlimed *c* sub-plots. On N_2 P K Na Mg and N_3 P K Na Mg the yield of *b* was slightly less than on *a* but little different on the N_2 P Na Mg and on the N_3 P K Na Mg plus silicate.

The yield of the crops on all plots is influenced by the rainfall between mid-March and early July. Statistical examination of the effect of an extra 25 mm rain

in the years 1858-1902 showed that the effect was greatest when the rain came during the second half of April ; it was also greater on the ammonium sulphate than on the sodium nitrate plots (CASHEN, 1947).

Botanical composition

Changes due to treatment have occurred continuously throughout the experiment ; tables 6 and 7 give results for the botanical composition in 1948-49.

i) *Changes due to treatment between 1856 and 1949.*

The Latin names of the species are given fully in table 7 but in the text the generic name only, except where two species occur in the same genus. This avoids confusion between the numerous genera beginning with A. Species have been divided into 3 groups, grasses, legumes and other species, some of which are useful components of hay. Full details of the results of botanical analyses are given by LAWES and GILBERT, 1859 ; LAWES, GILBERT and MASTERS, 1882 ; HALL, 1905 ; BRENCHLEY, 1924, 1925, 1930, 1935 *a*, 1935 *b* and BRENCHLEY and WARINGTON, 1969.

Botanical analyses of seven plots were made in 1858 (LAWES and GILBERT, 1859). Grasses, legumes and other species contributed 76, 5 and 16 p. 100 respectively to the yield of the unmanured plot in that year. P K Na Mg fertilisers increased the legumes to 23 p. 100 and decreased other species to 2 p. 100 ; where ammonium salts were also applied the grasses were increased to 97 p. 100, legumes were eliminated and other species much decreased. Sodium nitrate, not tested until 1858, had similar effects. These large initial differences in the proportion of the three main groups of plants have persisted throughout the duration of the experiment but changes have occurred in the composition of the groups themselves. The main grasses on most plots in 1858 were *Lolium* and *Holcus* ; *Arrhenatherum* was also abundant on the P K Na Mg and F.Y.M. plots.

Further, more detailed analyses of all plots were done in 1862 — by then the plots had become botanically more distinct. Botanical separations were repeated at five-year intervals until 1877 (LAWES, GILBERT and MASTERS, 1882). Fifty species of higher plants were identified in the hay from the unmanured plots in these analyses, compared to 20 in 1858. Grasses contributed 70 p. 100 to the yield. *Agrostis* and *Festuca rubra* were most plentiful, but *Lolium* and *Holcus* remained important constituents. During the first twenty years other species contributed about 22 p. 100 to the yield ; there was no single dominant species but *Plantago* was prominent during 1862-67. Many species have persisted on this plot ; the changes that have occurred are associated with the depletion of nutrients and the consequent decrease in yield (table 3). Between 1877 and 1903 the number of species decreased from about 50 to about 40 ; grasses decreased while other species, especially *Leontodon*, *Plantago* and *Poterium*, increased. In 1948, thirty-six species of higher palnts were recorded (table 6) ; *Agrostis* and *Festuca rubra* were the main grasses ; legumes, mainly *Lotus* and *Trifolium pratense*, contributed 7 p. 100 of the yield and the twenty-one other species, 40 p. 100. Plants characteristic of poor land *e.g. Briza media* and *Primula veris* occur on this plot and there are some species which are rare in other localities near Rothamsted. All the species found on the other plots grow on this plot, which remains the closest approximation to the state of the whole field in 1856. Liming the unma-

TABLE 6

Number of species and percentage of total produce of grasses, legumes and other species on some of the Park Grass plots in 1948-49

Treatment	Unmanured		PNaMg		PKNaMg		N_1		$N_2PKNaMg$		N_2PNaMg		$N_3PKNaMg$		$N_3PKNaMgSi$		N_1*		N*PKNaMg		FYM + fish meal	
	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L
No. of grasses	11	12	14	14	13	14	6	11	5	12	7	7	2	6	6	5	9	15	10	10	9	12
Percentage	53	36	53	53	47	57	95	63	99	90	100	94	100	98	99	98	71	83	92	94	74	67
No. of legumes.....	4	4	4	4	5	4	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	3
Percentage	7	16	7	11	20	25	0	5	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	2	3	1	11
No. of others	21	16	15	16	12	13	5	14	1	7	1	4	1	2	1	3	10	13	5	6	12	13
Percentage	40	48	40	35	33	18	5	32	1	7	t	6	t	2	1	2	29	14	6	3	25	22
Total No. of species .	36	32	33	34	30	31	11	28	6	20	8	11	3	8	7	8	20	29	16	17	23	28

U : Unlimed ; L : Limed ; N as ammonium sulphate ; N* as sodium nitrate ; t : trace (< 0.5 p. 100). For full explanation of treatments see tables 1 and 2.

TABLE 7. — *Percentage contribution* (a) *by weight of the principal species on some of the Park Grass plots during 1948-49*

Treatment (*b*)	Unmanured		PNaMg		PKNaMg		N_1		N_2PKNaMg		N_2PNaMg		N_3PKNaMg		N_3PKNaMgSi		N_1*		N_2* PKNaMg		FYM and fish meal	
	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L
Agrostis tenuis	16	1	3	1	4	t	75	1	8	4	52	1	—	—	5	—	1	1	t	t	16	t
Alopecurus pratensis	8	6	4	13	8	3	t	2	—	38	t	29	t	82	t	58	14	7	32	12	32	10
Anthoxanthum odoratum	1	1	2	1	4	t	t	1	t	4	10	2	—	—	—	—	9	1	t	—	6	t
Arrhenatherum elatius	t	t	14	15	2	12	—	3	1	15	5	4	—	2	1	18	—	2	36	45	3	26
Bromus mollis	—	—	—	t	t	2	—	—	—	t	—	—	—	—	—	—	—	1	t	t	—	t
Dactylis glomerata	4	3	13	6	16	13	3	18	—	12	t	—	—	5	t	10	25	21	14	14	9	21
Festuca rubra	17	4	5	2	5	1	16	15	t	4	10	55	—	t	t	—	9	22	—	13	4	1
Festuca pratensis	—	—	t	7	t	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
Helictotrichon pubescens	3	13	2	11	1	5	t	12	—	t	—	—	—	—	—	—	2	20	1	5	—	t
Holcus lanatus	4	2	7	2	3	1	—	6	91	3	21	t	100	3	93	2	9	2	—	—	2	4
Lolium perenne	—	—	t	—	—	t	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2	—	—	—	—
Poa pratensis	t	2	1	1	3	1	—	1	—	9	—	3	—	5	—	11	—	t	5	3	1	2
Poa trivialis	—	t	t	1	t	1	—	t	—	t	—	—	—	—	—	—	—	1	2	1	t	1
Trisetum flavescens	t	1	t	2	1	2	—	2	—	t	—	—	—	—	—	—	—	1	t	t	—	t
Lathyrus pratensis	1	2	1	2	11	16	—	2	—	4	—	—	—	—	—	—	t	—	2	3	t	8
Lotus corniculatus	4	7	3	6	t	t	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	—	—	—
Trifolium pratense	2	6	3	4	5	3	—	t	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	t	2
Trifolium repens	t	1	1	t	3	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	t
Achillea millefolium	1	1	7	4	14	1	—	2	—	t	—	1	—	—	—	—	1	1	—	—	4	t
Centaurea nigra	1	2	2	3	4	t	1	2	—	—	—	—	—	—	—	—	5	1	—	—	t	1
Cerastium holosteoides	t	t	t	t	—	t	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	t	t	—	—	t	t
Conopodium majus	2	t	1	t	1	t	t	t	—	t	—	—	—	—	—	—	t	t	—	—	1	t
Heracleum sphondylium	—	—	—	—	1	4	—	—	—	2	—	—	—	—	—	t	—	t	—	t	—	—
Knautia arvensis	1	2	1	4	—	t	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Leontodon hispidus	18	12	4	6	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	4	2	—	—	2	1
Plantago lanceolata	6	13	15	13	7	5	—	20	—	t	—	t	—	—	—	—	14	6	2	t	15	11
Potentilla reptans	t	—	—	—	—	—	2	t	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Poterium sanguisorba	6	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ranunculus acris	t	3	6	2	1	2	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	t	2	—	—	t	2
Rumex acetosa	2	1	3	2	2	t	2	2	—	1	t	5	—	1	1	1	t	t	t	1	2	1
Taraxacum officinale	t	t	t	t	t	2	—	1	—	3	—	t	—	t	—	1	1	1	3	1	1	3

a) Only those species contributing at least 2 p. 100 on at least one plot are listed. This explains why most columns do not add up to 100 p. 100. The percentage contribution of all species contributing more than 0.5 p. 100 has been rounded to the nearest whole number, and those contributing less than this are denoted by 't'.

b) U = Unlimed ; L = Limed Half Plots ; N as Ammonium Sulphate ; N* as Sodium Nitrate (See tables 1 and 2).

nured plot had a relatively small effect on yield and on the botanical composition except that *Agrostis* and *Festuca rubra* usually decreased and *Helictotrichon* increased. *Plantago* and *Poterium* were increased but *Conopodium* and *Leontodon* decreased (table 7). During the last fifty years lime has also increased the proportion of legumes.

When P K Na Mg were added without N, the vegetation remained diverse, but less so than when the soil was unmanured. The large proportion of legumes, mainly *Lathyrus* and *Trifolium pratense*, which established in the early years, has persisted. Percentage grasses, especially *Festuca rubra*, decreased but *Dactylis* and *Alopecurus* increased. Other species, particularly *Achillea* and *Plantago*, also increased at the expense of the grasses. In 1948 *Dactylis* and *Alopecurus* were also plentiful on the limed half of this treatment and *Arrhenatherum* and *Helictotrichon* were much increased. Except for *Heracleum* most of the « other species » were decreased by lime.

When only P Na Mg were given (*i.e.* K was omitted) legumes usually, but not always, decreased. In 1948 *Lathyrus* contributed less than 1 p. 100 of the herbage, but *Lotus* was more abundant without than with K. Grasses contributed about 50 p. 100 on both plots (7 and 8) but *Arrhenatherum* was more plentiful without than with K. *Plantago*, *Ranunculus* and *Leontodon* were more, and *Centurea* less, prominent without than with K. Liming the P Na Mg treated soil greatly increased the percentage of *Helictotrichon* but, as on the P K Na Mg plot, discouraged *Agrostis*, *Anthoxanthum* and *Holcus*. The main difference between the grasses on the limed halves of the P K Na Mg and P Na Mg plots was a greater prominence of *Alopecurus* and *Dactylis* when K was given.

The effects of nitrogen on botanical composition have depended on the source and amount of N as well as on what other nutrients were applied. In the absence of P K Na Mg, 48 kg N ha^{-1} (N_1) as ammonium sulphate (Plot 1) acidified the soil to such an extent that the number of grass and other species progressively declined between 1877 and 1948. *Agrostis* increased greatly from the 1920s onwards and by 1948 it made up three-quarters of the herbage. Legumes were eliminated early and *Rumex* and *Potentilla* became the main other species. Liming increased the range and type of grasses, allowed some legumes to re-establish and *Plantago* to flourish.

When 96 kg N ha^{-1} (N_2) was given as ammonium sulphate together with P K Na Mg (Plot 9), legumes were eliminated, other species became less frequent and the number of grasses decreased gradually between 1856 and 1948. *Arrhenatherum* was plentiful on this plot until about 1920 ; afterwards *Holcus* increased rapidly and was dominant for about 30 years. Our records, however, do not allow us to determine whether there is a critical soil pH below which only *Holcus* can thrive. Apart from *Agrostis* (8 p. 100) no other grass contributed significantly to the herbage in 1948. Liming this treatment allowed *Alopecurus*, *Arrhenatherum* and *Dactylis* to dominate the herbage but many other grasses also occurred. Lime also enabled *Lathyrus* to establish ; it remained in small amounts until 1940 but then increased more rapidly. Seven other species, mainly *Taraxacum* and *Heracleum*, contributed 7 p. 100 to the yield in 1948. On plot 10, K was omitted after 1862 and giving only N_2 P Na Mg caused an increase in *Alopecurus*, *Agrostis* and *Festuca* by 1877. In contrast to the N_2 P K Na Mg treatment, *Arrhenatherum* did not increase after 1877, but *Alopecurus* remained plentiful until the 1920s. After that it rapidly decreased and only a small

percentage occurred in 1948. *Agrostis* increased rapidly during the 1920s and by 1948 it dominated the herbage on this plot but there was also much *Anthoxanthum*, which had always been plentiful ; *Holcus* also was plentiful in 1948. Liming allowed *Alopecurus* to re-establish and become dominant on the limed half of the plot between 1914 and 1940 but it then declined as *Festuca rubra* increased ; by 1948 there was almost twice as much *Festuca rubra* (55 p. 100) as *Alopecurus* (29 p. 100).

The number of species decreased most rapidly where the largest amount of N (144 kg ha^{-1}) was given as ammonium sulphate with P K Na Mg. *Agrostis* (29 p. 100), *Holcus* (20 p. 100), *Dactylis* (17 p. 100), *Arrhenatherum* (15 p. 100) and *Alopecurus* (10 p. 100) were the main components of the herbage on this plot in 1877. *Holcus*, *Alopecurus* and *Arrhenatherum* increased between 1877 and 1903 ; *Holcus* continued to increase, became dominant during the next ten years, and has remained so ever since. The limed half of this plot was dominated by *Alopecurus* (82 p. 100) in 1949 ; no legumes and few other species occurred.

The botanical composition of the plot given N_3 P K Na Mg plus silicate has been similar to that without silicate but *Holcus* became dominant later : in 1914, when *Holcus* (91 p. 100) dominated the N_3 P K Na Mg plot, *Arrhenatherum* and *Alopecurus* still contributed 40 p. 100 where the same treatment was given with silicate. When lime and silicate were given, *Alopecurus* contributed 57 p. 100 to the yield and *Arrhenatherum*, *Poa pratensis* and *Dactylis* were also abundant.

Where nitrogen was given as sodium nitrate the surface soils, even of the unlimed half-plots remained less acid than those given ammonium sulphate and this, in turn, gave large differences in the swards. Where 48 kg N ha^{-1} was given as sodium nitrate (N_1*) the sward did not change as much as where it was given as ammonium sulphate. *Alopecurus*, *Agrostis*, *Festuca rubra* and *Holcus* were the main grasses in the early years and, with the exception of *Agrostis*, they were also important constituents in 1949, when *Dactylis* (25 p. 100) was the most abundant grass. By 1948 the main effect of lime had been to increase *Helictotrichon* and *Festuca rubra*, to increase *Lotus* and to decrease other species from 29 to 14 p. 100.

With 96 kg N ha^{-1} as sodium nitrate plus P K Na Mg grasses were encouraged and legumes and other species greatly discouraged. Comparing the effects of N_2 as sodium nitrate and ammonium sulphate on the unlimed halves of plots 14 and 9 respectively shows that different species of grasses have been encouraged on the two plots. On the unlimed half of plot 14 (N_2* P K Na Mg) *Poa trivialis* and *Holcus* were prominent in the early years but afterwards declined, *Holcus* to such an extent that it was absent after 1914. *Alopecurus* increased during the first twenty years and remained at 20-30 p. 100 until 1948. *Arrhenatherum* has increased greatly since the beginning of this century and *Dactylis*, which had been prominent in the early years and had then declined, became prominent again from about 1920 onwards. In 1948, therefore, the main components of the herbage on plot 14 without lime were very similar to those of plot 9 with lime. Lime decreased *Alopecurus* and increased *Festuca* on plot 14.

On the plot given F.Y.M. and fish meal since 1905, grasses — mainly *Alopecurus*, *Agrostis* and *Dactylis* — contributed 74 p. 100 and twelve other species, but mainly *Plantago*, *Achillea* and *Rumex*, 25 p. 100. Lime decreased percentage *Alopecurus* but increased *Arrhenatherum*, *Dactylis*, *Lathyrus*, *Taraxacum* and *Ranunculus*.

ii) *Changes due to treatment since 1949.*

a) *Changes on sub-plots with unaltered lime treatments.*

The botanical composition of sub-plots *a* and *d* in 1973-74 (table 8) can be compared with that of the limed and unlimed halves respectively of the same plots in 1948-49 (table 7) to assess changes during 25 years.

On the unlimed sub-plot given only ammonium sulphate (plot 1) *Agrostis* continued to dominate the herbage but *Anthoxanthum* has increased with a corresponding decrease in *Festuca*. *Holcus* remains dominant on the N_3 P K Na Mg plots with and without silicate. *Anthoxanthum*, however, now contributes 5 p. 100 to the yield of the N_3 P K Na Mg plot without silicate. On the unlimed sub-plots of the N_2 P K Na Mg and N_2 P Na Mg plots *Anthoxanthum* has increased to such an extent that it is now dominant. *Holcus* has decreased on the N_2 P K Na Mg plot from 91 to 13 p. 100. As in the past, *Agrostis* remains an important constituent of the N_2 P Na Mg plot.

The changes that have occurred under the old liming scheme on the *a* sub-plots of these five plots have been similar. The percentage contribution of *Alopecurus* has been at least halved and that of *Arrhenatherum* has increased greatly. *Holcus* has increased but *Poa pratensis*, *Dactylis* and *Festuca* have decreased. On the N_2 P Na Mg plot *Anthoxanthum* has greatly increased. The increase in *Lathyrus* on the N_2 P K Na Mg plot, noted earlier, has continued and *Anthriscus sylvestris* and *Heracleum* have increased on this and on the N_3 P K Na Mg plots. These species are still absent on the N_2 P Na Mg plot, where *Rumex* has declined but *Taraxacum* increased. On the F.Y.M. plot the relative proportions of *Alopecurus* and *Agrostis* have been reversed and *Holcus* has increased.

b) *Changes since 1965 on sub-plots which have received lime in the new scheme* (table 8).

Comparing the botanical composition of sub-plots *a* with *b* and *c* with *d* permits an assessment of the effects of the new liming scheme introduced in 1965. As might be expected, liming the previously unlimed *c* sub-plots has caused large changes in the botanical composition of the swards (WILLIAMS, 1974) but changes resulting from increased rates of lime on the previously limed half-plots have been smaller, but nervetheless significant.

By 1973, 12.5 t ha^{-1} of calcium carbonate, applied between 1965 and 1968, to sub-plot 1 *c*, had decreased percentage *Agrostis* from 85 to 20 p. 100 and increased percentage *Festuca rubra* from 2 to 49 p. 100. Since the yield of the *c* sub-plot at the first cut in 1973 was three times larger than that of the *d* the decrease in the absolute amount of *Agrostis* was less, but the increase in *Festuca rubra* much more, than the percentage figures alone would suggest. Liming allowed legumes to establish on this sub-plot, especially *Lathyrus* which invaded from the neighbouring N_2* P K Na Mg plot, and thirteen other species which in total contributed 16 p. 100 to the yield. These were mainly *Plantago*, *Rumex*, *Cerastium* and *Centaurea*.

On the N_2 P K Na Mg and N_2 P Na Mg plots, lime at 18 and 20 t ha^{-1} greatly discouraged *Anthoxanthum*, decreasing it from about 70 p. 100 to about 9 p. 100. On the N_2 P K Na Mg plot *Anthoxanthum* was replaced mainly by *Holcus* and *Poa pratensis* ; however, on the N_2 P Na Mg plot *Festuca rubra* was increased as much as *Holcus* but *Poa pratensis* less than on the N_2 P K Na Mg plot. Small amounts of

TABLE 8

Number and percentage contribution by weight of grasses, legumes and other species on those Park Grass plots which have received lime under the new scheme

Treatment	N_1		$N_2PKNaMg$				N_2PNaMg				$N_3PKNaMg$				$N_3PKNaMgSi$				FYM + fish meal	
	c	*d*	*a*	*b*	*c*	*d*	*a*	*b*	*c*	*d*	*a*	*b*	*c*	*d*	*a*	*b*	*c*	*d*	*c*	*d*
Number of grasses	6	3	10	9	9	4	7	8	9	7	6	7	7	2	8	7	9	3	9	9
Percentage	82	98	82	75	91	100	94	97	98	100	95	94	99	100	95	96	98	100	85	91
Agrostis tenuis	20	84	—	—	11	15	2	3	36	31	—	—	—	—	—	t	2	2	19	32
Alopecurus pratensis	—	—	15	8	1	t	8	7	t	t	30	17	9	—	29	15	7	—	15	16
Anthoxanthum odoratum	10	11	t	2	11	72	16	18	8	69	—	—	—	5	t	—	t	t	6	9
Arrhenatherum elatius	—	—	53	51	3	—	20	22	t	t	38	64	30	—	50	61	28	—	28	7
Dactylis glomerata	—	—	2	4	t	—	—	—	1	—	2	2	6	—	1	5	6	—	3	2
Festuca rubra	49	3	t	2	4	—	39	37	24	t	—	t	2	—	t	—	4	—	1	3
Helictotrichon pubescens	—	—	1	2	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Holcus lanatus	1	—	7	6	44	13	4	7	21	t	22	7	37	95	11	3	31	98	14	20
Poa pratensis	2	—	2	1	16	—	6	3	7	t	2	3	12	—	1	2	13	—	t	—
Poa trivialis	t	—	2	—	1	—	—	—	t	—	1	1	3	—	3	10	8	—	—	t
Number of legumes	2	—	1	2	2	—	1	—	—	—	1	—	—	—	1	1	—	—	2	2
Percentage	2	—	11	16	3	—	t	—	—	—	t	—	—	—	t	t	—	—	9	2
Lathyrus pratensis	1	—	11	16	3	—	t	—	—	—	t	—	—	—	t	t	—	—	5	t
Trifolium pratense	1	—	—	t	t	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	2
Number of other species	14	2	5	4	4	—	6	8	3	1	4	4	4	—	4	4	5	—	8	11
Percentage	16	2	7	9	6	—	6	3	2	t	5	6	1	—	4	4	2	—	6	7

Sub-plots *c* and *d* were analysed in 1973 and *a* and *b* in 1974. See table 5 for explanatation of *a*, *b*, *c*, *d* and *t*.

Arrhenatherum and *Dactylis* also occurred on both plots. Legumes and *Anthriscus* and *Heracleum* also established on the N_2 P K Na Mg but not on the N_2 P Na Mg plot ; *Taraxacum* established on both plots. The changes that have occurred on the N_3 P K Na Mg plots have been similar. Following the application of lime at 20 t ha^{-1}, *Holcus* has declined from 97 to 35 p. 100 and *Arrhenatherum* (28 p. 100), *Alopecurus* (8 p. 100), *Dactylis* (6 p. 100) and *Poa pratensis* and *Poa trivialis* have established as well as small amounts of four other species. The main effect of recent lime on the previously unlimed part of the F.Y.M. plot has been to decrease *Agrostis* and to increase *Arrhenatherum* and the legumes.

Because the limed halves of the N_3 P K Na Mg plots were more acid and needed more lime than the N_2 P K Na Mg and N_2 P Na Mg plots to change the pH to 6, the changes in the botanical composition have been correspondingly larger on the *b* sub-plots of the former than on those of the latter group. On the N_3 P K Na Mg plots extra lime has increased the contribution of *Arrhenatherum*, but halved that of *Alopecurus*, decreased *Holcus*, but slightly increased *Heracleum* and *Anthriscus*. On the N_2 P K Na Mg plot, lime decreased percentage *Alopecurus* and further increased the legumes, mainly *Lathyrus*, from 11 to 16 p. 100. On sub-plot *b* of the N_2 P Na Mg plot, which needed only 3.7 t ha^{-1} of lime, changes in the botanical composition have been negligible.

Ecological genetics of Anthoxanthum odoratum *and other plant species*

Anthoxanthum has always been one of the most widely-distributed plant species occurring on both limed and unlimed, fertilised and unfertilised plots. Recently, it has been one of the most abundant species on some of the more acid plots. Its wide distribution could be due to the fact that morphologically and physiologically different populations have evolved on the various plots. This possibility has been investigated by measuring, under uniform conditions, morphological and physiological attributes of plants collected from many contrasted plots. Information has been obtained on the extent, rate and significance of changes within the species. Morphological differences exist between populations (SNAYDON, 1970 ; SNAYDON and DAVIES, 1972) ; these differences are usually correlated with environmental conditions on the plots from which they were collected, and are apparently adaptive. Populations also differ in their response to mineral nutrients ; again the differences appear adaptive (DAVIES and SNAYDON, 1973 *a* and *b*, 1974 ; DAVIES, 1975). The adaptive nature of the differences between populations was confirmed by growing them under uniform conditions for several years and then transplanting them back into either their own or other plots. Each population survived and grew fastest in its own plot (DAVIES and SNAYDON, 1976).

Similar studies of *Anthoxanthum* populations from the recently-limed sub-plots have indicated that genetic changes have occurred within seven years and that populations collected less than 1 m apart but from opposite sides of plots boundaries differ both morphologically and physiologically (SNAYDON and DAVIES, 1976). These differences have developed despite appreciable gene flow, caused by pollen drift and seed dispersal.

Differences have also been demonstrated between populations of *Lolium perenne* (GOODMAN, 1969), *Holcus lanatus* and *Dactylis glomerata* (REMISON, 1976)

collected from the Park Grass experiment. Such differences probably also exist between populations of many other species that occur in this experiment. RICHARDS (personal communication) recognised 12 species of *Taraxacum officinale* agg. on the plots, one or two species on each plot where *Taraxacum* was abundant, the taller species on the plots with the tallest hay and the flattest rosettes on the plots with the shortest vegetation.

Chemical composition of the crops

Results are given for three 4-year cycles, 1920-23, 1940-43 and 1956-59 of the liming scheme introduced in 1903. The crops grown during 1856-1873 were analysed chemically (LAWES and GILBERT, 1900) but the changing botanical composition

TABLE 9

Percentage N P K Na Ca Mg in the dry matter of the first crop of herbage, Park Grass, means of 12 years 1920-23, 1940-43, 1956-59

U = unlimed, L = limed half of each plot

Plot	Treatment	Percentage element in dry matter					
		U	L	U	L	U	L
		N		P		K	
	No nitrogen group						
3	Unmanured	1.87	1.82	0.14	0.16	1.47	1.34
8	P NaMg	1.75	1.72	0.38	0.36	1.20	1.22
7	PKNaMg	1.76	1.72	0.32	0.30	2.90	3.17
	Ammonium-N group						
10	N_2P Na Mg	2.24	1.88	0.29	0.33	0.66	0.55
9	N_2PKNaMg	1.69	1.50	0.26	0.27	2.72	2.76
11/1	N_3PKNaMg	2.02	1.76	0.25	0.27	2.67	3.04
	Nitrate-N group						
16	N_1^*PKNaMg	1.52	1.44	0.29	0.28	2.80	2.65
14	N_2^*PKNaMg	1.46	1.46	0.26	0.25	2.57	2.66
		Na		Ca		Mg	
	No nitrogen group						
3	Unmanured	0.35	0.34	0.97	1.03	0.24	0.33
8	P NaMg	0.49	0.40	0.83	0.78	0.24	0.26
7	PKNaMg	0.05	0.03	0.52	0.70	0.14	0.18
	Ammonium-N group						
10	N_2P NaMg	0.53	0.54	0.18	0.51	0.16	0.26
9	N_2PKNaMg	0.06	0.02	0.15	0.36	0.11	0.13
11/1	N_3PKNaMg	0.10	0.05	0.16	0.26	0.12	0.12
	Nitrate-N group						
16	N_1^*PKNaMg	0.18	0.11	0.39	0.50	0.14	0.15
14	N_2^*PKNaMg	0.27	0.21	0.28	0.36	0.12	0.13

of the herbage during that period partly invalidates comparison with later ones. Table 9 shows the percentages of N, P, K, Na, Ca and Mg in the first crops and table 10 the amounts (kg ha^{-1}) of these elements in the total produce. Any comparison of the effects of treatment on chemical composition is limited by the fact that the botanical composition of the herbage was also much affected by treatment.

TABLE 10

Average yearly content of N P K Na Ca Mg in the herbage (1st plus 2nd crops), *Park Grass, mean of three periods 1920-23, 1940-43, 1956-59*

U = unlimed, L = limed half of each plot

Plot	Treatment	kg element per hectare					
		U	L	U	L	U	L
		N		P		K	
	No nitrogen group						
3	Unmanured	27	31	2	2	20	21
8	P NaMg	49	41	11	9	31	28
7	PKNaMg	67	76	11	13	103	129
	Ammonium-N group						
10	N_2P NaMg	73	83	9	14	20	25
9	N_2PKNaMg	81	86	12	16	122	146
11/1	N_3PKNaMg	116	118	14	18	156	189
	Nitrate-N group						
16	N_1^*PKNaMg	68	74	12	13	114	121
14	N_2^*PKNaMg	94	84	17	14	152	140
		Na		Ca		Mg	
	No nitrogen group						
3	Unmanured	4	6	12	19	3	6
8	P NaMg	13	9	24	20	7	7
7	PKNaMg	2	1	21	31	6	8
	Ammonium-N group						
10	N_2P NaMg	18	22	8	24	6	11
9	N_2PKNaMg	2	1	9	22	6	7
11/1	N_3PKNaMg	6	2	12	20	7	8
	Nitrate-N group						
16	N_1^*PKNaMg	8	4	18	27	7	8
14	N_2^*PKNaMg	14	10	20	22	8	7

Nitrogen

Although fertiliser nitrogen was given only in the spring, percentage nitrogen in the second crop was nearly the same as in the first crop for all treatments (table 9). Lime decreased the percentage N in the crops grown with ammonium sulphate. On

plots without N, or where N was given as sodium nitrate, the percentage N was not altered by giving lime and the differences in the amounts of N in the crops reflected the effects of lime on yield (table 10).

The crop grown on the unmanured soil removed 29 kg N ha^{-1}. About the same amount is removed by other crops grown at Rothamsted on soils unmanured for longer than 100 years (JOHNSTON, 1976). Where P K Na Mg was given, the crop removed more N (72 kg N ha^{-1}) because legumes, mainly *Lathyrus pratensis*, fixed N. However, the extra 43 kg N ha^{-1} is small compared to the amounts that can be fixed by legumes. We do not know whether this was because these legumes naturally fix little N or whether it was because they were growing in competition with other plants. When 96 kg N ha^{-1} was applied as ammonium sulphate or sodium nitrate, the crops removed 84 and 90 kg N ha^{-1} respectively. When the percentage recovery of applied N is calculated as shown in table 17, note *b*, then these crops recovered 57 and 64 p. 100 of the 96 kg N ha^{-1} dressing. With 48 kg N ha^{-1} as sodium nitrate, the crop apparently recovered 90 p. 100 of the applied N but the few legumes on this plot may have contributed some of the total N in the crop. With 144 kg N ha^{-1} as ammonium sulphate, 60 p. 100 of the N was recovered.

Phosphorus

The unmanured crop contained only 0.15 p. 100 P but where much P fertiliser had been given for longer than 60 years the crop contained 0.25 to 0.35 p. 100 P. The amount of P removed yearly ranged from 2 to 18 kg P ha^{-1} ; the largest extra uptake represented an apparent recovery of about 50 p. 100 of the applied P.

Potassium

Potassium was the only nutrient of which there was always more in the first crop than in the second, probably because K was applied only once each year, in winter. Where K fertiliser was given the crops removed 100 to 190 kg K ha^{-1} each year ; the largest amount removed was about three-quarters of the added K. The percentage K in crops given K fertiliser was about twice that in unmanured crops and the unmanured crops contained more K than those grown on soils given N P fertilisers only. Herbage given only N P removed so much extra K before 1920 that the annual K uptake had decreased to about 20 kg K ha^{-1} between 1920-60. This small amount is much the same as that removed by winter wheat and spring barley grown at Rothamsted and similarly manured for the same length of time.

Sodium, magnesium and calcium

Results in tables 9 and 10 show how much fertiliser K depressed the concentration of Na in the dry matter and the uptake of Na by the herbage. Even when much sodium (184 kg Na ha^{-1}) was given as sodium nitrate and sodium sulphate (plot 14), less than 10 p. 100 was removed by the crop.

Magnesium was always applied with sodium and only in small amounts (11 kg Mg ha^{-1}). Percentage Mg in the dry herbage exceeded 0.2 p. 100 only if yields were small ; with larger yields Mg levels were often only 0.11 to 0.13 p. 100 Mg. Where

Mg was given, the crops removed 6 to 8 kg Mg ha^{-1} on all plots (limed and unlimed), except on the limed half of plot 10 (N_2 P Na Mg) where they removed 11 kg Mg ha^{-1}. This large value without K fertiliser may be due to K : Mg interaction.

Percentage calcium was largest when no manures were given and decreased with all manurial treatments. The amounts of calcium removed in the crops were only slightly increased, by 14 kg Ca ha^{-1} at most, by the application of about 1 700 kg Ca ha^{-1} as lime every fourth year.

The nutrient composition of different crops

The feeding value of herbage depends not only on its yield but also on its chemical composition. The results from Park Grass show that although crops given different combinations of fertiliser and lime may yield similarly their mineral element composition may vary greatly. Table 11 shows the percentages of N, P, K, Na, Ca and Mg in the first and second crops of five plots which all yielded 4.39 to 4.64 t ha^{-1} of dry herbage.

TABLE 11

The composition of crops grown on plots which yielded 4.39 to 4.64 t ha^{-1} of dry herbage, Park Grass 1920-59

(3.39 to 3.51 t ha^{-1} as 1st crop : 0.88 to 1.26 t ha^{-1} as 2nd crop (*a*))

Plot	Treatment	Percentage element in dry matter					
		1st crop	2nd crop	1st crop	2nd crop	1st crop	2nd crop
		N		P		K	
7L	PKNaMg	1.7	1.9	0.30	0.36	3.2	2.6
10L	N_2P NaMg	1.9	1.9	0.33	0.33	0.6	0.6
9U	N_2PKNaMg	1.7	1.8	0.26	0.25	2.7	2.3
16L	N_1^*PKNaMg	1.4	1.6	0.28	0.29	2.6	1.9
16U	N_1^*PKNaMg	1.5	1.7	0.29	0.31	2.8	2.1
		Na		Ca		Mg	
7L	PKNaMg	0.03	0.03	0.70	0.88	0.18	0.18
10L	N_2P NaMg	0.54	0.35	0.51	0.66	0.26	0.23
9U	N_2PKNaMg	0.06	0.06	0.15	0.26	0.11	0.11
16L	N*PKNaMg	0.11	0.07	0.50	0.68	0.16	0.16
16U	N_1^*PKNaMg	0.18	0.12	0.39	0.54	0.14	0.14

a) 1st and 2nd crop ; hay and aftermath respectively.

b) N ammonium sulphate, N* sodium nitrate ; PKNaMg fertilisers applied late winter, N fertiliser applied in spring.

The analyses of the first and second crops (hay and aftermath respectively) were similar. Where K was given, percentage K was less, but percentage Ca was greater, in the second cut than in the first. There were three large differences in the composition of the crops :

1. Herbage grown on very acid soil with N_2 P K Na Mg (plot 9 U) contained very little Mg (0.11 p. 100) but where K was omitted, N_2 P Na Mg (plot 10 U), it contained more than twice as much Mg (0.26 p. 100 and 0.23 p. 100 in the hay and aftermath respectively).

2. Percentage Ca was very small (0.15 and 0.26 p. 100) in herbage grown on very acid soil (plot 9 U).

3. The herbage of all plots given K fertiliser contained little sodium even though on plot 16 extra sodium (84 kg Na ha^{-1}) was given as sodium nitrate.

Magnesium, calcium and sodium are all implicated in certain metabolic disorders of ruminants. These results well show that the concentration of these elements may depend on fertiliser and lime treatments.

The concentrations of some free amino acids in the herbage of some Park Grass plots are also affected by potassium fertiliser and lime (NOWAKOWSKI, JOHNSTON and LAZARUS, 1975). Where lime was given, K fertiliser did not affect the percentage of protein N in the total N of the grass but it increased glutamic and aspartic acid concentrations. On soils of pH 3.8, K fertiliser increased protein N and the concentration of aspartic and glutamic acids, but decreased that of serine, basic amino acids, asparagine and glutamine. Lime, with or without K, had a large effect. Without lime the herbage contained only 0.12 p. 100 Ca and asparagine, glutamine and proline all accumulated in the plant.

The effect of manuring and liming on soil reaction

When the Park Grass experiment started some soils were described as ' sour ', a property defined by the type of plants growing on them, but the concept of acidity and the use of a pH scale to measure it had not then been developed. In the 1920s Crowther at Rothamsted investigated various methods of measuring the pH of soil water suspensions. In 1923 he determined the soil reaction (pH) of all the surface and sub-soils on the Park Grass plots using the hydrogen electrode method and a 1 : 5, soil : water suspension (CROWTHER, 1925). In 1959 the pH was measured again using a glass electrode and a 1 : 2.5, soil : water suspension, and in 1975 the pH of the *a* sub-plot soils were measured. WARREN and JOHNSTON (1964) gave the pH values for samples taken in 1923 and 1959 and discussed in detail the changes due to liming and manuring.

Table 12 shows the pH values for the surface soils in 1923, 1959 and 1975. Between 1923 and 1959 both surface and sub-soils of plots given no fertiliser N or sodium nitrate without lime slowly became more acid. Compared to soils without N, sodium nitrate increased soil pH by 0.5 to 1.0 pH unit by 1923 and this difference persisted unchanged during the next 36 years (table 12). It is not known why sodium nitrate increased pH before but not after 1923.

Ammonium sulphate without lime greatly acidified the soils, even below 23 cm. CROWTHER (1925) concluded that pH 3.8 represents the maximum acidity of the Park Grass soil and the 1959 results confirm this : the pH value (3.7) of the surface soil of the unlimed plots getting most ammonium sulphate (706 kg ha^{-1} each year) did not change during 36 years. Soils receiving 471 kg ha^{-1} ammonium sulphate were also at pH 3.7-3.8 in 1959 while the smallest amount of ammonium sulphate (235 kg ha^{-1}) had decreased the pH to 4.0. Except with the smallest amount of ammo-

nium sulphate, the soil between 23 to 46 cm deep on these plots was almost as acid (pH 4.1 to 4.4). In these very acid soils aluminium and manganese are important exchangeable cations.

TABLE 12

Soil reaction, Park Grass, 1923, 1959 and 1975
Surface soils, 0-23 cm
U = unlimed, L = limed half of each plot (*a*)

Plot	Treatment	pH in water				
		1923		1959		1975
		U	L	U	L	L
	No nitrogen group					
3	Unmanured	5.7	6.9	5.2	7.2	7.1
8	P NaMg	5.7	7.0	5.2	7.0	6.9
7	PKNaMg	5.4	6.7	4.9	7.0	6.6
	Ammonium-N group					
1	N_1	4.8	6.5	4.0	7.2	6.6
10	N_2P NaMg	3.9	4.7	3.8	5.6	5.5
9	N_2PKNaMg	4.0	4.5	3.8	5.3	5.0
11/1	N_3PKNaMg	3.8	4.1	3.7	4.2	4.3
11/2	N_3PKNaMgSi	3.8	4.6	3.7	4.6	5.1
	Nitrate-N group					
17	N^*_*	6.3	6.8	5.7	7.5	—
16	N^*PKNaMg	5.9	7.2	5.4	7.1	6.8
14	N^*_2PKNaMg	6.4	6.7	6.0	7.3	7.0
	FYM group					
13	FYM[b]	4.6	5.8	4.7	7.0	6.9

a) Lime applied every fourth year since 1903
b) FYM applied only every fourth year since 1905, N_2PKNaMg each year 1856-1904.
— Not measured.

Any consideration of the effect of lime must take account of the fact that it was not applied regularly until 1903 whereas ammonium sulphate has been applied each year since 1856. The lime given every fourth year has been equivalent to 4.3 t $CaCO_3$ ha^{-1}, except in 1971 and 1975 when the *a* sub-plots received half this rate. Liming the plot given 235 kg ha^{-1} ammonium sulphate increased the pH of the top 23 cm of soil by 0.7 pH unit between 1923 and 1959 but for some unknown reason the soil became more acid again during 1960-75. Lime increased the pH of soils receiving 471 kg ha^{-1} ammonium sulphate from 4.7 to 5.5 during 1923-59 but the pH of the sub-soils remained unchanged. Between 1960 and 1975 12.9 t $CaCO_3$ ha^{-1} maintained these soils at pH 5.4. Where most ammonium sulphate was given (plots 11^1 and 11^2) the pH of both surface and sub-soils did not change during 1923-59. Between 1960

and 1975, while the pH of plot 11[1] remained unchanged that of plot 11[2], given silicate as well, increased by 0.5 pH unit.

Table 12 shows that the unlimed and limed soils of plot 13 (FYM and fish meal since 1905) were quite acid (pH 4.8 and 5.8 respectively) in 1923 as a result of applying 471 kg ha^{-1} ammonium sulphate each year from 1856 to 1904. Between 1923-59 FYM did not change the pH on the unlimed half-plot, but where lime was given the pH increased considerably.

For the period 1923-59 two estimates can be made of the loss of Ca from these soils. The first is that, even on soils receiving no N or sodium nitrate, much calcium, equivalent to 0.75 to 0.88 t $CaCO_3$ ha^{-1}, was lost each year from the surface soil. The second is that where most ammonium sulphate was given all the calcium in the lime dressing, equivalent to more than 1 t $CaCO_3$ ha^{-1} each year, was lost from the top 46 cm of soil. Most of this loss must be in the drainage water because the crops removed relatively little calcium. Between 1959-75 all the $CaCO_3$ applied (equivalent to 0.8 t ha^{-1} $year^{-1}$) on the *a* sub-plots was lost from the soils receiving 471 kg ha^{-1} ammonium sulphate.

TABLE 13

Amounts of chalk applied in the new liming scheme on Park Grass and the pH (in water) *of successive horizons of the soil profile in 1959, 1971 and 1974*

Plot	pH, November 1959				Chalk applied t ha^{-1} 1965-68	pH, November 1971				pH, March 1974			
	'mat'	horizon[a]				'mat'	horizon[a]			'mat'	horizon[a]		
		1	2	3			1	2	3		1	2	3
Sub-plots without a 'mat' and soil pH intended to be 6													
4/2[b]	—[b]	6.0	5.7	5.3	3.7	—	6.5	6.3	5.8	—	5.8	6.1	5.8
9[b]	—	5.5	5.2	5.1	7.5	—	6.5	5.7	5.2	—	6.0	5.6	5.3
10[b]	—	5.8	5.5	5.4	3.7	—	6.3	6.2	5.7	—	6.0	5.9	5.6
Sub-plots with a 'mat' and soil pH intended to be 6													
11/1[b]	5.5	4.2	4.1	4.4	24.9	6.4	4.9	4.6	4.6	6.2	4.7	4.4	4.3
11/2[b]	5.2	4.7	4.5	4.6	15.1	—	6.5	6.2	5.6	—	6.2	5.4	4.9
Sub-plots without a 'mat' and soil pH intended to be 5													
13[c]	—	4.7	4.6	4.9	3.7	—	5.8	5.2	5.2	—	5.3	4.8	4.8
Sub-plots with a 'mat' and soil pH intended to be 5													
1[c]	3.8	3.7	3.9	4.4	12.4	6.7	4.7	4.3	4.5	6.4	4.3	4.3	4.7
4/2[c]	3.7	3.6	3.7	3.9	22.4	6.3	4.7	4.2	4.3	6.1	4.1	3.9	4.1
9[c]	3.7	3.4	3.8	4.0	17.6	6.2	4.4	4.1	4.2	6.3	4.3	4.1	4.2
10[c]	3.9	3.4	3.7	4.1	20.0	6.4	5.0	4.2	4.2	6.2	4.4	4.2	4.1
11/1[c]	3.7	3.6	3.6	3.8	20.0	6.3	4.2	4.0	4.1	6.2	4.4	4.1	4.6
11/2[c]	3.7	3.5	3.7	4.0	20.0	6.5	4.2	4.0	4.2	6.6	4.5	4.0	4.0

a) Horizons 1, 2, 3, are the 0 to 7.5,7.5 to 15 and 15 to 22.5 cm depths of soil respectively.

b) — shows there was no 'mat' of partially decomposed organic material on the surface of the mineral soil.

One reason for modifying the liming treatments on Park Grass was to measure how much chalk was needed to maintain pH levels of 7, 6, 5 and 4 when manurial treatments differ as much as on Park Grass.

JOHNSTON (1972) gave in detail preliminary results for the changes in pH on soils of sub-plots *b* and *c* in the new liming scheme started in 1965. Table 13 gives the amounts of chalk applied during 1965-68 (none was given in 1971-75), and the pH values of the soils in 1959, 1971 and 1974. Evidently, when grassland is undisturbed and percolating water has to take calcium down the profile, soil pH changes only very slowly. On those sub-plots 4^2b, 9 *b*, 10 *b*, 13 *c*, which had no ' mat ' (a layer of partially decomposed organic matter on the surface) the soil 0-7.5 cm deep (horizon 1) became slightly more acid between 1971 and 1974 and soils on these sub-plots will soon need more chalk to maintain the appropriate pH. On sub-plots which had ' mats ' of organic matrial the pH of the ' mat ' increased considerably by 1971 but that of the underlying mineral soil changed little even though much chalk was given. There was little change in the pH of either the ' mats ' or the mineral soils on these sub-plots between 1971 and 1974 (table 13) suggesting that much of the added calcium had been held in the ' mat '. On sub-plot 11^2b the pH of the mineral soil increased rapidly after the ' mat ' disappeared, presumably as a result of increased biological activity following the first chalk application.

The effects of the manures and lime on soil constituents

All soils were sampled from 0-23 cm depth. Detailed results for soils sampled in 1959 have been given previously (WARREN and JOHNSTON, 1964) ; these together with some earlier results are summarised here.

a) *Organic matter and nitrogen.*

Soil on the unlimed half of each plot was sampled in 1913, at which time the limed halves had received only three dressings of lime. All half-plots were sampled in 1959, when there was a ' mat ' of partially decomposed organic material of varying thickness on the surface of the very acid soils (unlimed plots 1, 4^2, 9, 10, 11^1 and 11^2 and limed plots 11^1 and 11^2). Attempts were made to separate the ' mat ' which contained 1.5 to 2.0 p. 100 N, from the underlying mineral soil ; percentage N in mineral soil is given in tables 14 and 15.

TABLE 14

Percentage N in top soil (0-23 cm), *Park Grass 1913 and 1959*
Unlimed half-plots only

Treatment	1913	1959
Unmanured	0.275	0.278
PK	0.250	0.255
Nitrate-N plus PK	0.269	0.271
Ammonium-N plus PK	0.286	0.325

Soil N changed very little between 1913 and 1959 (table 14) in three of the four groups of unlimed soils, suggesting that percentage N had reached an equilibrium value of about 0.27 p. 100 N. Only in very acid, ammonium sulphate treated soils had percentage N increased.

In 1959 there were large differences in pH between limed and unlimed soil (table 12) and also differences in amounts of C and N (table 15). Unlimed soils contai-

TABLE 15

Organic carbon and nitrogen contents of Park Grass soils 1959
Surface soils 0-23 cm

U = unlimed, L = limed half of each plot

Plot	Treatment	Organic carbon (p. 100)[a]		Total N (p. 100)	
		U	L	U	L
	No nitrogen group				
3	Unmanured	3.3	4.0	0.27	0.33
8	P NaMg	3.0	3.7	0.24	0.31
7	PKNaMg	2.8	3.4	0.23	0.30
	Ammonium-N group				
1	N_1	3.0	3.5	0.24	0.30
10	N_2P NaMg	4.2	3.5	0.34	0.28
9	N_2PKNaMg	4.1	4.0	0.30	0.31
11/1	N_3PKNaMg	4.5	4.1	0.34	0.30
11/2	N_3PKNaMgSi	4.7	3.7	0.35	0.29
	Nitrate-N group				
17	N_1^*	2.9	3.5	0.26	0.30
16	N_1^*PKNaMg	3.6	3.8	0.28	0.32
14	N_2^*PKNaMg	2.9	3.7	0.27	0.32
	FYM group				
13	FYM[b]	3.1	3.8	0.25	0.32

(*a*) Percentage carbon was determined by the method described by WALKLEY (1947) and multiplied by a factor of 1.3.

(*b*) FYM applied only every fourth year since 1905, N_2PKNaMg each year 1856-1904.

ned less organic matter than limed soils except those given ammonium sulphate supplying 96 and 144 kg N ha^{-1} ; these soils contained more. Where lime had been given, soils without N and with ammonium- and nitrate-N all contained on average about 0.30 p. 100 N (range 0.28-0.33 p. 100 N). This effect of liming is interesting ; apparently it has slightly increased the equilibrium value for percentage N in many soils, especially those without N or treated with sodium nitrate. Limed soils had a pH about 7, compared with pH values ranging from 5 to 6 in similarly treated but unlimed soils.

The apparently inconsistent result is that percentage N was larger in some unlimed ammonium sulphate treated soils than in similarly treated limed soils (table 15), and that percentage N in these soils increased between 1913 and 1959 (table 14). All these unlimed soils were already very acid, pH less than 4.0, in 1923 and it is possible that at this pH the rate of mineralisation of organic matter in soil was considerably decreased. In addition there may have been some slight contamination of the mineral soil with ' mat ' in 1959. RICHARDSON (1938) found that the very acid soils had no earthworms and concluded that the ' mat ' formed because of the effect of acidity on earthworms rather than on the microbiological decomposition of the organic matter. However, a laboratory study by SHAW (1958) showed that the ' mat ' decomposed slowly and that decomposition was faster when lime was added.

b) *Phosphorus and potassium.*

Table 16 shows the total P, P soluble in 0.5 *M*-$NaHCO_3$, and K exchangeable with 1 *N*-ammonium acetate, in the top 23 cm of soil in 1959. Residues of fertiliser P have accumulated in the surface soils and the amount depends on how much the

TABLE 16

Total and soluble phosphorus and exchangeable K in the surface soils, Park Grass 1959

U = unlimed, L = limed half of each plot

Plot	Treatment	mg element kg^{-1}					
		Total P		P soluble in 0.5*M* $NaHCO_3$		K exchangeable with 1*N* ammonium acetate	
		U	L	U	L	U	L
	No nitrogen group						
3	Unmanured	489	568	5	8	79	71
8	P NaMg	1 341	1 527	142	108	76	77
7	PKNaMg	1 319	1 339	126	98	670	609
	Ammonium-N group						
1	N_1	516	589	5	7	56	61
10	N_2P NaMg	1 484	1 222	222	95	65	82
9	N_2PKNaMg	1 364	1 226	174	103	218	388
11/1	N_3PKNaMg	1 274	1 166	211	134	220	240
11/2	N_3PKNaMgSi	1 267	1 124	187	94	220	252
	Nitrate-N group						
17	N*	502	557	5	7	72	62
16	N_1^*PKNaMg	1 399	1 502	88	128	668	612
14	N_2^*PKNaMg	1 100	1 352	42	85	494	474
	FYM group						
13	FYM[a]	915	1 021	49	43	101	113

a) FYM applied only every fourth year since 1905, N_2PKNaMg each year 1856-1904..

crop removed. There was relatively more bicarbonate-soluble P in the very acid than in the less acid soils. The amounts of exchangeable K reflect both K manuring and the removal of K in the harvested crops.

Where P has been applied, some is now found at depths below 23 cm (WARREN and JOHNSTON, 1964). Similar downward movement of P into sub-soils has not occurred on arable soils at Rothamsted except where annual dressings of FYM have been given for more than 100 years. We do not know why fertiliser P has moved downwards on Park Grass but there is a common factor in that P movement has occurred on soils rich in organic matter.

Where much potassium has been given and little has been removed in the crop, K also has moved downwards through the soil on Park Grass. Much of this sub-soil K cannot be recovered by shallow-rooting species. The amounts of fertiliser K applied to grassland should therefore be adjusted to balance that removed by the crop ; otherwise fertiliser is wasted.

Recent experiments on the more efficient use of N fertilisers

Two features of the Park Grass experiment introduced by LAWES and GILBERT have persisted : the herbage is still cut for hay and all the nitrogen is applied in spring. However, where large yields are required the practice of manuring grassland has changed ; grass is cut more frequently and solid nitrogen fertilisers are applied more than once each year. To assess how permanent grassland would respond to these management practices small plot experiments have been made on plots 5 and 6 (fig. 1) since 1965.

Plot 6 was divided into 40 small plots to test amounts and times of N application and the frequency of cutting. The largest amount of N tested was 450 kg N ha^{-1},

TABLE 17

Yield of dry herbage and uptake of N.
Rates of N experiment, Park Grass 1972-73

N applied annually kg ha^{-1}	0[a]	0 sp[a]	75	150	225	300	375	450
Dry herbage t ha^{-1}	6.20	1.82	6.33	7.94	9.78	11.57	11.75	12.49
N in dry herbage kg ha^{-1}	171	35	154	185	231	300	339	379
Percentage recovery of applied N[b]	—	—	159[c]	100	87	88	81	76

a) To measure the contribution of the legumes in the sward to yield and nitrogen fixation some plots without N were sprayed with herbicide to kill legumes ; this allowed the uptake of non-legume N to be measured and the recovery of fertilizer N calculated.

b) Percentage recovery calculted as :

$$\frac{\text{(uptake on treated soil) minus (uptake on untreated soil)}}{\text{amount applied}} \times 100$$

c) Some legumes, still present in the sward on this plot, contributed N to the total N uptake, hence apparent recovery of fertiliser N exceeds 100 p. 100.

about three times that on the main experiment, and as many as six cuts per year have been taken. During the first years of the experiment the herbage responded up to the largest amount of N but with large amounts of N and infrequent cutting, bare patches occasionally developed in the sward. Since 1971 this experiment has been modified to test seven amounts of nitrogen, the plots are cut four times each year and a quarter of each amount of fertiliser N is given for each cut. Yields of dry herbage, N in the dry herbage and the apparent recovery of the applied fertiliser N in 1972-75 are shown in table 17.

Yields ranged from 1.8 to 12.5 t dry herbage ha^{-1} and there has been no serious deterioration in the sward. The recovery of added nitrogen in this experiment was much larger than in the main experiment. About 90 p. 100 of the N applied (up to 300 kg N ha^{-1}) was recovered in the dry herbage. The apparent recovery of 159 p. 100 of the 75 kg N ha^{-1} was due to extra N in the legumes in the sward. These large recoveries were probably because nitrogen was applied for each cut. Evidently large yields and recoveries of N can be obtained from permanent pasture on this soil-type and in this climate. Frequent cutting of herbage given no nitrogen has almost eliminated *Lathyrus pratensis* but encouraged *Trifolium pratense* and *Trifolium repens*. We hope to do complete botanical analyses for all treatments after the botanical compositions have stabilised.

DISCUSSION

This experiment quickly achieved its original object of determining how hay yields could be increased by the use of suitable fertilisers. However, as the experiment continued not only were there changes in yield but in the botanical composition of the swards, and these latter changes have continued until today there are large differences between swards, due to treatment. With few exceptions all the crops grown since 1856 have been removed and plant nutrients in the soil have either been depleted or enriched depending on manurial treatment and the size of the crop. In addition some treatments so acidified the soil that on some plots soil reaction is now less than pH 4. No studies have been made on minor elements but the very acid soils must contain much exchangeable aluminium and manganese. It is possible that the observed changes in the relative abundance of some species, *e. g. Alopecurus*, *Anthoxanthum* and *Holcus* on a few plots may be due to changes in amounts of minor elements. We hope that comparative studies on the response to minor elements of some selected species taken from these plots and from natural habitats will be studied soon by colleagues outside Rothamsted.

The decline in *Lolium* right from the start of the experiment could be due to the fact that the genotype present on Park Grass had developed under grazing and was, therefore, not well suited to a hay regime. It might also have failed to adapt to the impoverishment which occurred on the plots with incomplete or no fertiliser.

The studies of *Anthoxanthum*, which occurs on most plots, have shown that within this species there are strains or varieties differing in height and in nutrient requirements. These differences are related to plot treatment and the height of the vegetation on it, and are adaptive because plants raised from them thrive better

when transplanted back into their own plots than into others. Gene-flow across plot boundaries is limited to approximately 0.5 m in either direction for *Anthoxanthum*.

Taraxacum is abundant only on plots given K and lime (table 7) and was one of the genera which invaded the newly-limed section *c* of the very acid plots 11^1 and 11^2 (N_3 P K Na Mg). There are a number of plots with the correct nutrient requirements and pH for *Taraxacum* but with vegetation differing greatly in height and density. The mechanism of plasticity in *Taraxacum* differs from that of *Anthoxanthum*. In the grass, variation is intraspecific, but *Taraxacum* consists of hundreds of apomictic species, twelve of which have been identified on Park Grass. Usually only two or three occur on one plot, the combination of species depending on the height of the surrounding vegetation. *Taraxacum* spp. found in the tall, dense crops on the limed sections of N_3 P K Na Mg plots have long, broad, erect leaves whereas those found on the unmanured or low-fertility plots produce flat rosettes of small, deeply-indented leaves.

No other species have yet been studied in detail on Park Grass, but it is possible to deduce nutrient requirements and acidity tolerances for some of them from their known distribution on the plots. *Agrostis* tolerates acid soil and deficiency of P and K ; it does not require large amounts of nitrogen. On plot 1 (N_1) only *Anthoxanthum* tolerates these conditions as well as does *Agrostis*, and the flora is consequently much less varied than on the adjacent unmanured or N_2* P K Na Mg plots. However, although *Anthoxanthum* tolerates K deficiency it can benefit from added K ; plants are taller on plot 9 (N_2 P K Na Mg) than on plot 10 (N_2 P Na Mg).

Holcus grows on unmanured and low-fertility soils but reaches its greatest density (100 p. 100) on the very acid (pH 3.7) soils of unlimed plots receiving N_3 PK Na Mg (table 7). Evidently it requires more nitrogen and is less tolerant of K-deficiency, than *Anthoxanthum*. The latter is presumably shaded out of plots where *Holcus* thrives. Fundamental studies comparing the habit and response to N and K of *Holcus* from different plots would help us to understand the principles underlying competition between species in the mixed flora of permanent grassland and why *Holcus lanatus* is dominant in some natural habitats *e.g.* hill-grazing in Yorkshire.

The species occurring on Park Grass differ in the time of year at which they make their vegetative growth and subsequently flower, and in the height to which they grow. The cutting-regime thus has a profound influence on their relative abundance. For example, *Alopecurus*, *Lolium* and *Dactylis* flower only before the first cut and *Agrostis* only before the second, but *Holcus* flowers abundantly both before and after the first cut. More frequent cutting affects many species. On the frequently-cut micro-plots, maintaining shorter vegetation favours the low-growing *Trifolium* species and is detrimental to *Lathyrus* which scrambles up among the stalks of taller species. Another example occurred on the main experiment in 1975. On some plots narrow, frequently-mown strips gave access to pitfall-traps for insects in 1973 and 1974. In 1975, on some plots *Bromus mollis* was far more abundant where these strips had been than in the surrounding crops, although no extra mowing was done in that year. Some alteration to the vegetation was expected due to this mowing so the strips were outside the areas to be sampled for yield. It will be interesting to see how long the difference persists and whether the copious seed-production of *Bromus* on the strips affects its abundance in adjacent areas in subsequent years.

The introduction of the new liming scheme in 1965 has added greatly to the

interest and value of this experiment, but the full effects will not be seen for some years. Some plots are not yet sufficiently acid for maintenance dressings of lime to be applied. In the first phase, when the *c* sub-plots of the unlimed halves of the more acid plots were limed, *Anthriscus*, *Heracleum* and several leguminous species have established on plot 9 *c* (N_2 P K Na Mg) but not on 10 *c* (without K). Raising the pH of the surface ' mat ' of dead, partly-decayed vegetation, in the presence of K (plot 9 *c*) seems to have been more important in admitting new species than the improvement in pH of the underlying mineral soil in the 7.5 to 15.0 cm layer on the no-K plot 10 *c* (table 13). This is to be expected if the new species arrive as seeds which must germinate, and the seedlings establish, first in the surface layer of the plot. The presence of a thick ' mat ' as on plot 11^1d and 11^2d, leads to the establishment of young plants growing in it, before they root down into the mineral soil below. A severe drought, or rough treatment by agricultural machinery, can detach the ' mat ' from the mineral soil. Plants growing only in the ' mat ' then die.

Liming the previously very acid plots 11^1c and 11^2c (N_3 P K Na Mg without and with Si) eventually allowed *Taraxacum* to establish. After the first application of lime, seeds germinated but the seedlings did not establish because the ' mat ' was still too acid for them. By 1971, with the pH of the ' mat ' raised to 6.3 or 6.5 (table 13) acidity was no longer a limiting factor and as the other requirement, sufficient K, was already met by the fertiliser treatment, *Taraxacum* plants became permanently established.

The spectacular alteration in the flora of small strips mown differently from the rest of the plots shows how difficult it is to do detailed experimentation on the plots without damaging them. Frequently inspected quadrats cause excessive trampling, especially when the hay grows tall. Removal of turf and large soil-cores admits alien species to the bare areas created. Nevertheless, this experiment provides data on, and ideas about, the differences in flora according to the fertiliser given, as described in the Results section, and on the behaviour of individual species, as discussed above. These ideas can and should be followed up in experiments elsewhere, as has been done for *Anthoxanthum*. In new experiments, randomised and replicated, fertiliser treatments can be tested outside the limits set by the old treatments. Plants can be taken from the plots as cuttings or seeds use in such experiments, and the scope for studies of our 60 genera or species and their interaction is vast.

Studies of the relative importance of some factors known to affect plant competition are difficult on these plots. Irrigation, shading and frequent sampling of small areas cannot be undertaken, and the diversity of the flora on some plots complicates the interpretation of variations seen in years with contrasting weather-conditions. Nevertheless, investigation elsewhere of the reactions of individual species or groups of species found on these plots can help in interpreting our records. Conservely, our records could provide a comparison under field conditions with the results of small-scale pot or plot experiments.

One practical use of the results, unforeseen when this experiment began, is their application to the management of roadside verges and amenity grassland. Excessive mowing and the use of herbicides can be avoided by using little or no nitrogenous fertiliser. This saves money, and helps to preserve desirable wild flowers. Park Grass has shown that decorative species such as *Primula veris*, *Ajuga reptans* and *Briza media* are eliminated from the flora by the use of any fertilisers. Unfortunately, often

new road verges are on agricultural soil of high fertility and containing weed-seeds; this makes it difficult to establish a flora resembling the unmanured plots of Park Grass. However, if the final aim is understood, mistakes in early management can be avoided. Photographs of the Park Grass plots are used in some University departments of architecture and landscape-planning, for teaching the principles of amenity-grassland management.

Reçu pour publication en mai 1976.

ACKNOWLEDGEMENTS

We gratefully acknowledge the careful work of numerous members of the Rothamsted scientific and farm staffs, extending over 120 years. We also thank Dr. R. W. SNAYDON of Reading University for writing the section on ecological genetics of *Anthoxanthum odoratum* and other plant species, summarising the work done on Park Grass by him and some of his postgraduate students.

RÉSUMÉ

OBSERVATIONS RÉCENTES CONCERNANT UN ESSAI SUR PRAIRIE PERMANENTE ÉTABLI EN 1856 : EFFETS DES ENGRAIS ET DU CHAULAGE SUR LA COMPOSITION BOTANIQUE, LES RÉCOLTES ET LES ANALYSES DU SOL

Différentes formules de fumure ont été utilisées annuellement depuis 1856 sur prairies permanentes fauchées chaque année pour le foin et on en a comparé les effets avec ceux du fumier de ferme et de traitements sans engrais. L'expérimentation porte sur trois doses d'azote, sous forme de sulfate d'ammoniaque (48,96 et 144 kg N ha^{-1}) et sur deux autres doses, sous forme de nitrate de sodium (48 et 96 kg N ha^{-1}) appliquées avec des engrais PK Na Mg, mais toutes les combinaisons de fumure ne sont pas réalisées. La fumure PK Na Mg a également été appliquée sans N. Entre 1903 et 1964 un chaulage a été effectué tous les quatre ans avec 2 240 kg Cao ha^{-1} sur les demi-parcelles de la plupart des traitements. En 1965, on a introduit un nouveau plan de chaulage, pour amener en principe les sols à des pH de 4,5, 6,7 sur les quatre sous-parcelles de chaque traitement. On a enregistré annuellement les rendements et certaines années les analyses botaniques et chimiques de l'herbe ont été effectuées. On a également fait des déterminations périodiques du pH des sols et de leur teneur en éléments nutritifs.

Cet article présente les résultats de 12 de ces 20 parcelles et comporte un bref résumé des travaux récents sur l'étude écologique d'*Anthoxanthum odoratum* présent sur la plupart des parcelles.

Depuis le début de l'essai, les rendements en foin ont varié en fonction du traitement. Durant les soixante premières années les différences dues aux traitements furent plus prononcées, bien que les rendements aient diminué sur la plupart des parcelles. Par la suite, de 1920 à 1960, ces derniers restèrent relativement stables, sauf avec la plus petite quantité de sulfate d'ammoniaque pour laquelle les rendements continuèrent à diminuer.

La parcelle non fertilisée continua à peu produire et le rendement le plus élevé fut obtenu avec la plus grande quantité d'azote + PK Na Mg. Quand PK Na et Mg était apporté avec des quantités équivalentes d'azote sous la forme de Nitrate de sodium sans ajout de chaux ou de sulfate d'ammonium avec addition de chaux, les rendements étaient semblables. L'utilisation de PK Na Mg seul et aussi de fumier de ferme alternant avec de la farine de poisson amène à des rendements moyens. Depuis 1960, les rendements obtenus ont été plus importants car les prélèvements étaient faits avant et non pas après les pertes subies durant la fenaison. Les rendements ont été améliorés sur les sols acides non chaulés précédemment, ceci à la suite d'un chaulage effectué

entre 1965 et 1968 ; des doses supplémentaires de chaux, apportées à des parcelles précédemment chaulées, sont restées pratiquement sans effets.

La végétation sur les sols non fertilisés est variée et se compose d'environ 50 espèces, avec une proportion égale de graminées et de dicotylédones ; le chaulage affecte peu la composition botanique. Les apports de PK Na Mg permettent de maintenir la diversité, mais les légumineuses ont tendance à augmenter, en particulier sur les parcelles traitées aussi avec de la chaux ; sur les sols où des doses de sulfate d'ammoniaque ont provoqué une acidification, l'herbe est dominée par des plantes tolérant l'acidité, soit *Agrostis*, *Anthoxanthum*, soit *Holcus*, en fonction des doses d'N et des autres éléments nutritifs apportés.

Le chaulage associé aux deux doses les plus élevées de sulfate d'ammoniaque entraîne une prédominance d'herbes plus productrices, comme *Arrhenatherum* et *Alopecurus*. A doses égales de N, le nitrate de sodium sans chaulage produit une couche herbeuse semblable à celle que l'on peut obtenir avec des apports de sulfate d'ammoniaque associés à un chaulage. Il est particulièrement intéressant de noter que la flore de nombreuses parcelles se modifie lentement, alors que les traitements fertilisants restent inchangés. *Agrostis* et *Anthoxanthum*, qui sont maintenant dominantes sur certaines parcelles, ne l'étaient pas jusqu'en 1930 et 1950 respectivement. L'abondance relative de *Alopecurus* et d'*Arrhenatherum* a également été sujette à des variations dans le temps sur de nombreuses parcelles. Le chaulage introduit par le nouveau plan de fumure a provoqué des changements importants dans la composition botanique sur les sols acides précédemment non chaulés ; les herbes tolérant l'acidité ont en général régressé, mais sans apport de K, *Festuca* s'est beaucoup multipliée.

Un apport de 96 kg N ha^{-1} a entraîné une augmentation inattendue de *Holcus* et une dose de 144 kg N ha^{-1} une diminution, inattendue elle aussi, mais *Arrhenatherum* et d'autres plantes fourragères ont eux aussi, augmenté. Sporadiquement quelques dicotylédones de diverses espèces se sont établies sur les parcelles.

Des doses croissantes de chaux sur des parcelles ayant déjà reçu de la chaux ont permis à *Arrhenatherum* de s'étendre, surtout au détriment d'*Alopecurus*. Des recherches sur les variations morphologiques et physiologiques chez *Anthoxanthum*, effectuées par SNAYDON *et al.*, de l'Université de Reading, ont mis à jour des différences d'une population à l'autre dans les caractères morphologiques et dans la réponse à la fumure minérale. L'apparition de ces différences a été rapide et locale et semble indiquer qu'il y a eu adaptation.

Le taux d'azote des différentes cultures a peu varié et les quantités d'N exportées par celles-ci furent en grande partie dépendantes du rendement. Les teneurs en P et K des récoltes étaient beaucoup plus élevées sur les parcelles fertilisées avec ces deux éléments, et l'absorption totale de P et de K par les plantes présentait de fortes variations. Les cultures renfermaient peu de Na et les teneurs en Na étaient encore plus faibles sur les parcelles fertilisées avec K. La teneur en Mg a diminué parallèlement à l'augmentation des rendements et c'est dans les traitements sans K que l'absorption de cet élément par les plantes a été la plus élevée. La teneur la plus importante en calcium a été obtenue dans les cultures sans *engrais* et la quantité exportée n'a pu être que légèrement augmentée par le chaulage. L'herbe cultivée sur sols acides contenait peu de Mg et de Ca.

Le pH des sols non fertilisés et celui des sols ayant reçu une fumure PK Na Mg se situe actuellement autour de 5. Les sols fertilisés avec du nitrate de sodium ont un pH de 6 à 7, mais les sols de toutes les parcelles traitées avec du sulfate d'ammoniaque sont très acides (pH 3,7-4,0). Dans les sols recevant les plus fortes doses de sulfate d'ammoniaque, la chaux appliquée depuis 1903 a été en grande partie perdue. Sur les parcelles chaulées conformément au nouveau plan, les changements du pH ont été lents. Il semble que le calcium soit retenu dans le « mat » superficiel, composé de matière organique partiellement décomposée. C'est dans les sols traités avec du sulfate d'ammoniaque que le pourcentage de matière organique a été le plus élevé ; toutefois dans le traitement au nitrate de sodium ce pourcentage n'a pas été supérieur à celui du témoin sans engrais. Dans la plupart des traitements le taux d'N du sol a peu varié entre 1913 et 1959 et il semble qu'une valeur d'équilibre ait été atteinte. Des reliquats de P se sont accumulés dans la couche superficielle du sol et, dans les sols à teneur élevée en matière organique, une partie de ce P a migré dans le sous-sol. Des reliquats de K se sont également accumulés là où l'apport de K a été supérieur à l'exportation par les récoltes.

Depuis 1965, dans un essai en micro-parcelles (situé sur une parcelle fertilisée avec PK Na Mg entre 1870 et 1963), nous avons étudié les effets de doses d'azote plus importantes et de coupes plus fréquentes que dans l'essai principal. Les rendements en herbe et la récupération de l'N par les plantes ont été supérieurs à ceux de l'essai principal et les diverses espèces de *Trifolium* ont été très stimulées.

ZUSAMMENFASSUNG

GEGENWÄRTIGE NACHWIRKUNGEN EINES IM 1856 EINGESETZTEN VERSUCHS AUF DAUERWIESEN WIRKUNGEN DER DÜNGER UND DER KALKUNG AUF DIE BOTANISCHE ZUSAMMENSETZUNG UND ANALYSEN DER KULTUREN UND BÖDEN

Seit 1856 wurden alle Jahre Düngerkombinationen einer Dauerwiese mit einer jährlichen Heuernte verabreicht und die Wirkungen dieser Behandlungen wurden den mit Stallmistgaben und ohne Düngung erzielten Wirkungen verglichen. Es wurden drei als Ammoniumsulfate (48, 96 und 144 kg N ha^{-1}) und zwei als Natziumperborat (48 und 96 kg N ha^{-1}) zugeführten Stickstoffgaben mit zusätzlicher P K Na Mg Zufuhr studiert, aber nicht alle Behandlungskombinationen wurden eingeschlossen. P K Na Mg sind auch ohne N verabreicht. Zwischen 1903 und 1964 erhielten die Halbparzellen der meisten Behandlungen 2 240 kg CaO ha^{-1} alle vier Jahre. Im Jahre 1965 wurde ein neues Kalkungsplan eingeführt, um über Böden mit einem pH von jeweils 4,5, 6 und 7 auf den vier Unterparzellen jeder Behandlung zu verfügen. Die Erträge wurden alle Jahre berechnet und die botanische und chemische Kraüterzusammensetzung wurde manchmal auch bestimmt. Schätzungen des pH und der Bödennährstoffgehälte wurden von Zeit zu Zeit gemacht. Dieser Bericht liefert die Ergebnisse für 12 unter den 20 Parzellen und enthält eine kurze Zusammenfassung der letzten Untersuchungen über die ökologische Genetik von *Anthoxanthum odoratum*, das auf der meisten Parzellen vertreten ist.

Die Heuerträge hängen von den seit dem Versuchsanfang durchgeführten Behandlungen ab. Die von der Behandlung bedingten Differenzen wurden während der sechsig ersten Jahren verstärkt, obgleich der Ertrag auf der meisten Parzellen abstieg. Dann, zwischen 1920 und 1960, sind die Erträge relativ beständig geblieben, ausser auf der Parzelle mit geringster Ammoniumsulfategabe, auf der die Erträge weiter absanken. Die unverdüngte Parzelle hatte immer noch einen niedrigen Ertrag und der höchste Ertrag wurde für die höchste Stickstoffgabe mit PKNaMg verzeichnet. Die Erträge waren gleich für PKNMg- Gaben mit gleichwertigen entweder als Natriumperborat ohne Kalk oder als Ammoniumsulfat mit Kalk Verabreichten Stickstoffmengen. Die alleinige PKNaMg-Düngung und der wechselweise mit Fischmehl zugeführte Stallmist ergaben mittlere Erträge. Seit 1960 sind die Ertragsschätzungen höher, weil sie vor und nicht nach den während der Heuernte erzeugten Verlusten durchgeführt worden sind. Die Erträge wurden nach einer zwischen 1965 und 1968 gemachten Kalkzufuhr auf saueren nicht vorhergekalkten Böden erhöht ; aber eine zusätzliche Kalkgabe auf schon gekalkten Böden wirkte wenig. Auf unverdüngten Böden ist die Vegetation vielfältig ; ungefähz 50 unter einjährigen Pflanzen und Dikotyledonen ebenfalls verteilte Pflanzenarten sind vertreten ; Kalk beeinflusst wenig die botanische Zusammensetzung. Im Falle von PKNaMg-Zufuhr hält die Mannigfaltigkeit an, aber die Leguminosen vermehren sich insbesondere mit zusätzlicher Kalkzufuhr. Wenn Ammoniumsulfat den Boden angesaüert hat, beherrschen die saürebeständigen einjährigen Pflanzen-entweder *Agrostis*, *Anthoxanthum* oder *Holcus* in Abhängigkeit von der Zufuhr von N und anderen Nährstoffen. Eine Kalkzufuhr mit den beiden höchsten Ammoniumsulfatgaben begünstigt die Beherrschung von ertragsreicheren einjährigen Pflanzen wie *Arrhenatherum* und *Alopecurus*. Für gleichwertige N-Gaben ergibt das Natriumperborat ohne Kalkzufuhr einen Rasen, der diesem mit Ammoniumsulfat und Kalk gleicht. Es ist bemerkenswert dass die Flora von vielen Parzellen sich langsam ändert obgleich die Düngung nicht variert. *Agrostis* oder *Anthoxanthum*, die heute auf einige Parzellen beherrschen, behrrschen erst seit den dreiziger bzw den sechsiger Jahren. Die relative Abundanz von *Alopecurus* und *Arrhenatherum* hat auch mit der Zeit auf vielen Parzellen variert. Die Kalkung nach dem neuen Plan hat bedeutende Änderungen in der botanischen Zusammensetzung auf vorher ungekaklten saueren Böden hervorgebracht ; saürebeständige Kraüter haben sich gewöhnlicherweise verringert, aber ohne K-Zufuhr hat sich *Festuca* sehr vermehrt. Mit 96 kg N ha^{-1} hat sich *Holcus* unerwartet vermehrt und mit 144 kg ha^{-1} nimmt es ab, aber *Arrhenatherum* und die anderen einjährigen Pflanzen haben sich auch vermehrt. Gelegentliche Pflanzen vieler Dikotyledonenarten sind auf der Parzellen hervorgetreten. Erhöhte Kalkgaben auf vhroer gekalktem Boden haben die Vermehrung von *Arrhenatherum* hauptsächlich auf Kosten von *Alopecurus* begünstigt. Die Untersuchungen von Dr SNAYDON *und al* der Universität von Reading über die morphologischen und physiologischen Veränderungen in *Anthoxanthum* haben eine Bestandsdifferenzierung erweist, die die morphologischen Eigenschaften und die Rückwirkungen hinsichtlich der mineralen Nährstoffe betrifft. Die Differenzen haben sich schnell und örtlich geändert und scheinen einem Anpassungsvermögen zu entsprechen.

Die Schwankung des N-Prozentsatzes in den verschiedenen Kulturen war klein und die N-Aufnahme durch die Pflanzen auf den verschiedenen Parzellen hing im grossen Umfang vom Ertrag ab. Der P- und K-Prozentsatz in den Kulturen Waren viel grösser mit P- und K-Düngung als ohne und die gesamte Aufnahme von beiden Stoffen varierte weitgehend. Die Kulturen enthielten wenig Na und dieser Gehalt sank mit K-Zufuhr ab. Mg-Prozentsatz nimmt mit Ertragserhöhung ab und die Aufnahme war höher ohne Kalkzufuhr. Der Höchste Ca-Prozentsatz wurde in Kulturen ohne Düngung erzielt und die auggenommene Menge war nur leicht durch Kalkung erhöht. Der auf saueren Böden gewachsene Rasen enthielt wenig Mg und Ca.

Die pH von ungedüngten und mit PKNaMg gedüngten Böden gleichen jetzt ungefähr 5. Die pH von Böden mit Natriumperboratzufuhr varieren zwischen 6 und 7, aber auf allen Parzellen mit Ammoniumsulfatzufuhr sind die Böden sehr sauer (pH 3.7-4.0). Auf den Böden mit der grössten Ammoniumsulfatgaben wurde ein grosser Teil des seit 1903 gebrachten Kalks verloren. Wo Kalk gemäss dem neuen Plan verabreicht worden ist, sind die änderungen des pH langsam vorgekommen, Ca scheint an der Oberfläche der teilweise zersetzten Stoffe zu bleiben. Der höchste Prozentsatz organischer Substanzen im Boden war auf den Böden mit Ammoniumsulfatzufuhr verzeichnet, aber es gibt nicht mehr organische Stoffe in den mit Natriumperborat verabreichten Böden als in unverdüngten Böden. In den meisten Behandlungen hat sich der N-Prozentsatz zwischen 1913 und 1959 wenig geändert und ein Gleichgewichtswert scheint erreicht zu sein. P-Rückstände werden in der Bodenoberfläche angehaüft und auf an organischen Stoffen reichen Böden haben einige davon in den Untergrund gewandert. K-Rückstände werden auch in den Böden angehaüft, die eine der Kulturaufnahme überlegene K-Gabe erhalten.

Seit 1965 werden grössere Stickstoffmengen und öftere Schnitte in einem Mikroparzelleversuch (auf einer Parzelle mit PKNaMg-Zufuhr zwischen 1870 und 1963) als in dem Hauptversuch getestet. Die Wieseerträge und N-Verwertung waren grösser als in dem Hauptverhsuc und *Trifolium* arten waren sehr begünstigt.

РЕЗЮМЕ

Модернизация опыта начатого в 1856-м году на постоянном лугу : влияние удобрения и известкования на ботанический состав, урожайность и анализы почв.

Ж. М. ТХЭРСТОН, И. Д. ВИЛЬЯМС, А. Е. ДЖОНСТОН.

На постоянных укосных лугах, скашивавшихся каждый год на сено, с 1856-го года применялись ежегодно различные формулы удобрения, и их действие сравнивалось с действием обработки навозом и с результатами полученными на делянках без удобрения. В опыте применялись 3 разных дозы азота в форме сернокислого аммония (48, 96 и 144 кг N/га$^{-1}$), и 2 дозы в форме нитрата натрия (48, и 96 кг N/га$^{-1}$) вносившиеся с РК, Na и Mg; но все возможные комбинации удобрений не были использованы полностью. Удобрение РК, Na, Mg, применялось также без азота. Между 1903-м и 1964-м годом, каждые 4 года, проводились также известкования в дозе 2 240 кг CaO/га$^{-1}$ на половинах делянок большей части обработок. В 1965-м году был реализован новый план известкований, для того чтобы довести pH почвы в принципе, от 4,5 до 6,7 на 4-х половинах делянок каждого варианта. Урожай регистрировался каждый год и в некоторые годы проводились ботанический и химический анализы травы. Периодически определялись также кислотность почв и содержание в них главных питательных элементов.

Данная работа заключает результаты, полученные на 12-ти из 20-ти делянок, и краткое описание недавно проведенных работ по экологии душистого колоска (*Anthoxanthum odoratum*), найденном на большинстве делянок.

С самого начала опыта урожай изменялся в зависимости от обработки. В течении первых 60-ти лет различия были более сильными, несмотря на уменьшение урожайности на большинстве из делянок. Позже, от 1920-го до 1960-го года, урожайность оставалась на одном и том-же уровне, за исключением варианта внесения максимальных количеств сернокислого аммония, в котором урожайность продолжала падать.

Неудобренная делянка продолжала приносить мало, а самый крупный урожай был получен при внесении самой крупной дозы азота, PK, Na и Mg. В случаях когда PK, Na и Mg вносились с эквивалентными количествами азота в форме нитрата натрия и без прибавления извести, или в форме сернокислого аммония с прибавлением этой последней, полученные урожаи были одного уровня. Применение Pк, Na, и Mg без азота, и поочередное внесение навоза и рыбной муки, давало посредственные результаты. Начиная с 1960-го года урожаи стали больше, ибо пробы стали отбираться не после, а до потерь вызванных укосом. Улучшение урожайности было достигнуто на кислых почвах, предварительно не известкованных, но получивших известь между 1965-м и 1968-м годом; дополнительное-же известкование делянок, предварительно уже известкованных, не произвело практически никакого благоприятного действия.

На неудобренных почвах растительность очень разнообразна и включает около 50 видов, причем пропорция злаковых и двусеменодольных в ней более или менее одинакова; известкование мало влияет на ботанический состав трав. Внесение PK, Na и Mg позволяет поддержать разнообразие, но с тенденцией к увеличению пропорции бобовых, в особенности на известкованных делянках; на почвах в которых высокие дозы сернокислого аммония вызвали увеличение кислотности, в разнотравьи господствуют растения хорошо выносящие кислотность : полевица (*Agrostis*) душистый колосок (*Anthoxanthum*) или бухарник (*Holcus*), в зависимости от применявшихся доз азота и других питательных элементов.

Известкование, комбинированное с двумя самыми крупными дозами сернокислого аммония, приводит к господству более продуктивных трав, как рай-грасс высокий (*Arrhenatherum*) и лисохвост (*Alopecurus*). При одинаковых дозах азота, нитрат натрия без известкования, дает слой травы того-же порядка что и сернокилый аммоний, комбинированный с известкованием. Но особенно интересно отметить, что флора многих делянок изменяется очень медленно, даже тогда, когда применяется одна и та-же обработка. Полевица (*Agrostis*) и душистый колосок (*Anthoxanthum*) преобладающие в настоящее время на некоторых делянках, не господствовали до 1930-го и 1950-го года соответственно. Относительное изобилие лисохвоста (*Alopecurus*) и рай-грасса высокого (*Arrhenatherum*) также изменилось со временем на многочисленных делянках. Известкование, введенное новым планом, вызвало очень сильные изменения ботанического состава трав на кислых, предварительно не известкованных почвах; отмечена была общая регрессия процента нечувствительных к кислотности трав, и в отсутствии калийного удобрения сильно распространилась овсяница (*Festuca*).

Внесение дозы в 96 кг N/га вызвало неожиданное увеличение процента бухарника (*Holcus*), а внесение дозы в 144 кг N/га, такое-же неожиданное уменьшение этого процента, в то время как пропорция рай-грасса высокого (*Arrhenatherum*) и других кормовых трав сильно увеличивалась. Спорадически появлялись на делянках и некоторые двусеменодольные, принадлежавшие к разным видам.

Увеличение доз извести на делянках уже известкованных, вызвало распространение рай-грасса высокого (*Arrhenatherum*), особенно за счет лисохвоста (*Alopecurus*). Исследование, посвященное морфологическим и физическим изменениям душистого колоска, проведенные Снайдоном и колл. в унверситете в Ридинге, выявили существование различий между популяциями этого вида в смысле морфологических характерностей и реакции на внесение минеральных удобрений.

Появляются эти различия очень быстро и локально и должно-быть указывают на применение растений. Процент азота изменялся мало в разных культурах и количества вынесенного ими элемента зависели в большинстве случаев от урожая. Сожание P и K в урожаях были гораздо выше на делянках удобренных этими элементами, но поглощение их растениями было очень разным. Культуры содержали мало натрия, и содержание его было еще более слабым на делянках получавших калий. Содержание магния уменьшалось параллельно увеличению урожайности и наиболее интенсивное поглощение этого элемента растениями наблюдалось на делянках не получавших калия. Наиболее высокое содержание кальция наблюдалось в культурах не получавших удобрения, и количество вынесенного растениями элемента увеличивалось только очень немного, после известкования. Травы культивируемые на кислых почвах содержали очень небольшие количества магния и кальция.

pH неудобренных почв и почв получивших удобрение PK, Na и Mg, не превышает в настоящее время 5. pH почв удобренных нитратом натрия находится между 6 и 7, но все почвы обработанные сернокислым аммонием имеют кислую реакцию (pH = 3,7-4,0). В почвах получавших самые крупные дозы сернокислого аммония, известь вносившаяся с 1903-го года, была, в большинстве случаев, — потеряна. На делянках, известкованных по новому плану, pH изменялся очень медленно. Кальций, кажется удерживался в поверхностном слое, составленном из частично разложившегося органического вещества. Процент органического вещества был наиболее велик в почвах получивших сернокислый аммоний, но в варианте с нитратом натрия содержание органического вещества не превышало его содержания в контрольных неудобренных делянках. С 1903-го до 1959-г. года процент почвенного азота менялся мало в зависимости от обработок, и здесь, кажется были достигнуты равновесные величины. Остаточные количества фосфора накоплялись в поверхностном слое почв, а в почвах с повышенным содержанием органического вещества, часть этого фосфора мигрировала в под-почву. Остаточные количества калия также накапливались в тех местах, где количество внесенного элемента превышало вынос его урожаем.

С 1965-го года, в опыте на микро-делянках (расположенных на делянке получавшей удобрение PK, Na и Mg с 1870-го по 1963-ий год), изучалось действие более крупных доз азота, и более частых, чем в главном опыте, укосов. Урожай трав и рекуперация азота растениями были лучше и интенсивнее чем в главном опыте и, отмечалась, кроме того, сильная стимуляция некоторых видов клевера.

REFERENCES

BRENCHLEY W. E., 1924. *Manuring of grassland for hay.* The Rothamsted Monographs on Agricultural Science. 144 pages, London : Longmans.

BRENCHLEY W. E., 1925. The effect of light and heavy dressings of lime on grassland. *J. Minist. Agric. Fish.*, **32**, 504-512.

BRENCHLEY W. E., 1930. The varying effect of lime on grassland with different schemes of manuring. *J. Minist. Agric. Fish.*, **37**, 663-673.

BRENCHLEY W. E., 1935 *a*. The influence of season and of the application of lime on the botanical composition of grassland herbage. *Ann. appl. Biol.*, **22**, 183-207.

BRENCHLEY W. E., 1935 *b*. Park Grass plots. *Rep. Rothamsted exp. Stn* for 1934, 138-159.

BRENCHLEY W. E., WARINGTON K., 1969. *The Park Grass plots at Rothamsted* 1856-1949. Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Herts.

CASHEN R. O., 1947. The influence of rainfall on the yield and botanical composition of permanent grass at Rothamsted. *J. agric. Sci. Camb.*, **37**, 1-10.

CLAPHAM A. R., TUTIN T. G., WARBURG E. F., 1962. *Flora of the British Isles.* 2nd edition. Cambridge University Press.

CROWTHER E. M., 1925. Studies on soil reaction, 3, 4, 5. *J. agric. Sci. Camb.*, **15**, 201-221 ; 222-231, 232-236.

DAVIES M. S., 1975. Physiological differences among populations of *Anthoxanthum odoratum* L. collected from the Park Grass Experiment, Rothamsted. IV. Response to potassium and magnesium. *J. appl. Ecol.*, **12**, 953-964.

DAVIES M. S., SNAYDON R. W., 1973 *a*. Physiological differences among populations of *Anthoxanthum odoratum* L. collected from the Park Grass Experiment, Rothamsted. I. Response to calcium. *J. appl. Ecol.*, **10**, 33-45.

DAVIES M. S., SNAYDON R. W., 1973 *b*. Physiological differences among populations of *Anthoxanthum odoratum* L. collected from the Park Grass Experiment, Rothamsted. II. Response to aluminium. *J. appl. Ecol.*, **10**, 47-55.

DAVIES M. S., SNAYDON R. W., 1974. Physiological differences among populations of *Anthoxanthum odoratum* L. collected from the Park Grass Experiment, Rothamsted. III. Response to phosphate. *J. appl. Ecol.*, **11**, 699-707.

DAVIES M. S., SNAYDON R. W., 1976. Rapid population differentiation in a mosaic environment. III. Measurements of selection. *Heredity*, Lond., **36**, in press.

EDWARDS C. A., LOFTY J. R., 1975. The invertebrate fauna of the Park Grass plots. I. Soil fauna. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1974, *Pt. 2*, 133-154.

EDWARDS C. A., BUTLER C. G., LOFTY J. R., 1976. The invertebrate fauna of the Park Grass plots. II. Surface fauna. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1975, *Pt. 2*, 63-89.

GOODMAN P. J., 1969. Intra-specific variation in mineral nutrition of plants from different habitats. In : *Ecological aspects of the mineral nutrition of plants.* Ed. I. H. Rorison, Blackwell Scientific Publications. p. 237-253.

HALL A. D., 1905. Experiments on grassland mown for hay every year. *The Rothamsted Experiments.* Chapter 9, 150-189.

JOHNSTON A. E., 1972. Changes in soil properties caused by the new liming scheme on Park Grass. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1971, *Pt. 2*, 177-180.

JOHNSTON A. E., 1976. Additions and removals of nitrogen and phosphorus in long-term experiments at Rothamsted and Woburn and the effect of the residues on total soil nitrogen and phosphorus. In : *Agriculture and Water Quality.* Tech Bull. Minist. Agric. Fish. Fd No. 32, 111-144.

JOHNSTON A. E., MATTINGLY G. E. G., 1976. Experiments on the continuous growth of arable crops at Rothamsted and Woburn experimental Stations : effects of treatments on crop yield and soil analyses and recent modifications in purpose and design. *Ann. agron.*, **27** (15-16).

LAWES J. B., GILBERT J. H., 1859. Report of experiments with different manures on permanent meadow land. *Jl. R. agric. Soc. of England. 1st series*, **19**, 552-573 ; **20**, Part II ,228-246 ; III, 246-272 ; IV, 398-441.

LAWES J. B., GILBERT J. H., 1871. Effects of the drought of 1870 on some of the experimental crops at Rothamsted. *Jl. R. agric. Soc. of England*, **7**, Part I, 91-132.

LAWES J. B., GILBERT J. H., 1880. Agricultural, botanical and chemical results of experiments on the mixed herbage of permanent meadow, conducted for more than twenty years in succession on the same land. Part I. The agricultural results. *Phil. Trans. R. Soc.* (A and B), **171**, 289-415.

LAWES J. B., GILBERT J. H., 1895. The feeding of animals for the production of meat, milk and manure and for the exercise of force. *The Rothamsted Experiments over fifty years*, Blackwood and Sons, London, 255-354.

LAWES J. B., GILBERT J. H., 1900. Agricultural, botanical and chemical results of experiments on the mixed herbage of permanent grassland, conducted for many years in succession on the same land. Part III. The chemical results. *Phil. Trans. R. Soc.* (B), **192**, 139-210.

LAWES J. B., GILBERT J. H., MASTERS M. T., 1882. Agricultural, botanical and chemical results of experiments on the mixed herbage of permanent meadow, conducted for more than twenty years in succession on the same land. Part II. The botanical results. *Phil. Trans. R. Soc.* (A and B), **173**, 1181-1413.

NOWAKOWSKI T. Z., JOHNSTON A. E., LAZARUS W., 1975. Effects of potassium deficiency and acidity on the composition of pasture grasses. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1974, *Pt.* 1, 83-84.

NUTMAN P. S., ROSS G. J. S., 1970. Rhizobium in the soils of the Rothamsted and Woburn Farms. *Rep. Rothamsted exp. Stn for 1969, Pt. 2*, 148-167.

PENMAN H. L., 1974. Rothamsted Weather. *Rep. Rothamsted exp. Stn for 1973, Pt. 2*, 172-201.

REMISON S. U., 1976. *A study of root interactions among grass species.* Ph. D. Thesis, University of Reading, England.

RICHARDSON H. L., 1938. The nitrogen cycle in grassland soils : with special reference to the Rothamsted Park Grass Experiment. *J. agric. Sci. Camb.*, **28**, 73-121.

SATCHELL J. E., 1955. Some aspects of earthworm ecology. In : *Soil Zoology.* Ed. D. K. Mc E. Kevan. London : Butterworths, p. 180-201.

SHAW K., 1958. *Studies on nitrogen and carbon transformations in soil.* Ph. D. Thesis, University of London.

SNAYDON R. W., 1970. Rapid population differentiation in a mosaic environment. I. Response of *Anthoxanthum odoratum* L. populations to soils. *Evolution*, **24**, 257-269.

SNAYDON R. W., DAVIES M. S., 1972. Rapid population differentiation in a mosaic environment. II. Morphological variation in *Anthoxanthum odoratum* L. *Evolution*, **26**, 390-405.

SNAYDON R. W., DAVIES M. S., 1976. Rapid population differentiation in a mosaic environment. IV. Populations of *Anthoxanthum odoratum* L. at sharp boundaries. *Heredity*, **36**, in press.

STAPLEDON R. G., 1939. *The plough-up policy and ley farming.* Chapter 8, The value of herbs, Faber and Faber Ltd., 107-109.

WARREN R. G., JOHNSTON A. E., 1964. The Park Grass Experiment. *Rep. Rothamsted exp. Stn* for 1963, 240-262.

WARREN R. G., JOHNSTON A. E., COOKE G. W., 1965. Changes in the Park Grass experiment. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1964, 224-228.

WALKLEY A., 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils, effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.*, **63**, 251-264.

WILLIAMS E. D., 1974. Changes in yield and botanical composition caused by the new liming scheme on Park Grass. *Rep. Rothamsted exp. Stn for* 1973, *Pt. 2*, 67-73.

DISCUSSION GÉNÉRALE — GENERAL DISCUSSION

J. LINDHARD.

Question : Did you use Am-sulphate as N-supply in the NPK-treatment, where the yield of FYM was increasing against NPK?

L. C. N. DE LA LANDE CREMER.

Answer : No ammonium nitrate.

M. THOMAS.

Question : Is there any consistency in the sequence of species evolution on the different plots (treatments) *i.e.* do « pionees » species operate under all fertility conditions? Any « indications » on this?

Miss JOAN M. THURSTON.

Answer : No. Changes are by eliminating species which are already there, not by introducing new ones. This field was in grass many years (at least 100) before the experiment began + the vegetation all over the field was similar at the start, with many species, as on the present unmanured plots. The only « introduced » species we see are occasional plants of *Chamaenerion angustifolium* (willow-herb) after a cold winter has killed some of the *Holcus*, then do not stay, when the normal vegetation of the plot becomes more competitive again as the weather improves.

F. JACQUIN.

Question : Pourriez-vous préciser votre définition du P organique et commenter l'enrichissement en cette forme de P dans les couches superficielles? Il s'agit d'un fait très intéressant et encore contesté de liaisons organo-phosphorés par l'intermédiaire des cations.

P. W. ARNOLD.

Answer : The definition of organic phosphorus is invariably linked with the method used for its determination. The method we prefer is that of MEHTA *and al.* (1954). Looking at our data it seems that the widest ratios found, for exemple, on the control plot come near 150. This may represent something approaching the smallest amount of organic P in humus which allows the humus to form and persist at least in the dynamic sense. Where there is abondant total P in the profile the organic C : organic P ratio is much marrower, around 100 in the present case, it may be that some organic P exists in a form not associated with the humus, but linked through cations to mineral matter. At present we have no data on the amounts of organic P which may occur outside the humus complex, if I may refer to it as such.

CONCLUSIONS

Pr G. W. COOKE (*Chairman of session 2*).

The factors that are important when starting new long-term experiments have been well illustrated in the papers we have heard and the discussions on them. My remarks apply mainly to long-term fertilizer experiments. But agricultural science has become very complex and the effects of fertilizers in different cropping systems are complicated by problems of plant diseases and pests. Because new experiments will go on for a long time, we must be concerned with soil-borne problems caused by insects, fungi, nematodes or weeds. It is also necessary to arrange for irrigation where this is possible.

The conclusions from the experiments must not be complicated or invalidated because poor yields are caused by dry weather or diseases or pests. All the factors that may influence results of the experiments must be recorded, particularly we will need continued records of changes in the soil.

When considering the principles to be involved in new long-term experiments we must always be bold. I am sure you will agree that the old experimenters were bold in their decisions to test wide-ranging treatments. The experiments that have survived for long periods have done so because large fertilizer rates were tested providing large contrasts between the treatments. The experimenters of the last century thought deeply about the treatments they used. In fact LAWES and GILBERT at Rothamsted made many correct decisions; they even found the right amount of nitrogen needed by their wheat crops a hundred and twenty years ago. Present-day advice on nitrogen fertilizer for wheat is the same to day as could be given for Rothamsted crops 100 years ago.

It is important to remenber the points that Mr JOHNSTON made this morning. Do not test treatments that only have a temporary interest. Only established varieties should be used, avoid new varieties thay may lose resistance to disease. In the Rothamsted wheat experiment we are still growing « Cappelle-Desprès » and you may ask why we do not use more modern variety, for example « Maris Huntsman » which, I believe, is known in France. We have not introduced « Maris Huntsman » because it is possible that its resistance to disease may break down; if this happens in a long-term experiment there is a verious break in continuity.

Plot sizes have been discussed. I think it is necessary to use big plots for two reasons : partly to avoid the mixing of soil at plot boundaries, such as Dr LINDHARD and Mr JOHNSTON have mentionned; secondly to allow subdivision of plots and modification of the experiments. It is impossible to forecast what modifications will be wanted in say twenty years'time. Long plots, but not too long may be best. Broadly based designs suitable for statistical analysis should be used; nevertheless it is essential to have a design which can be modified by confounding some treatments statistically, or by splitting the plots. In rotation experiments, it is important that each crop should be grown in each year, so that you have some replication in time, at least.

Now where should the experiments be sited? It may be desirable to have near the

laboratory, so that visitors can see them. But, this can be a short sighted policy. The experiments must be at a distance from woods and buildings. If near to the main laboratory the site may be needed for building. Then all that remains of your experimental fields will be a brass plate on a brick building!

Having choosen a suitable field, it must be surveyed in detail because lack of homogeneity of the site has upset many experiments in the past. So you must get the pedologists and soil surveyors to examine, describe and sample the soils for analysis.

In the published accounts of the Broadbalk experiment at Rothamsted, a very detailed description is given of soil variations. When you walk over this field, the soil *looks* uniform, nevertheless there are very large differences and the field contains two or three different soil series. So check whether the site is uniform; if it is very far from uniform, change it. My Colleague, Dr Dam KOFOED is going to talk about soil sampling problems.

Now, I must mention modifications to long-term experiments. The reason for modification must be to answer new questions, and much careful thought is needed before making the modifications; make the best of opportunity. Mr JOHNSTON spoke strongly on that topic this morning. You are likely to meet biological problems, and you may have to consult microbiologists, pathologists and maybe other specialists. Some problems are very complicated, for example both fungi and nematodes may transmit virus diseases, and it may be necessary to ask mycologists and nematologists to assist in interpreting experiment results. A soil chemist alone cannot take full account of biological problems; a multi-disciplinary approach is essential to solve the problems involved in experiments on cropping systems.

Some provision for identifying biological problems should be made when planning modifications. This morning, Mr HURRY introduced this topic when speaking about soil sterilization in connection with growing cereals for a long time. It is necessary to try to measure the interaction between biological and nutritional effects on crops.

All modifications that are made must be conservative. Be careful not to destroy the experiments; for example do not put on fertilizers where none have been applied before. Do not let concepts of good farming; dominate your thinking, avoid the temptation to try to grow good crops on *all* plots; concentrate on good experimental results. Working material of value to future generations is easily lost if we thing too much about good farming and not enough on good science. Mr JOHNSTON recommended « cold storage » for an experiment that is not needed immediately for research. The alternatives are to continue the previous manuring, or fertilizer dressing can be stopped altogether; in either case the plan is simply to grow crops and harvest them commercially until the experiment site is needed again.

The main features of an old experimental site devoted to manuring treatments will almost certainly be either depletion or accumulation of plant nutrients and changes in organic matter content. These are the features that must be maintained.

Pr Dam KOFOED (*) (*Président de la 3e Séance*).

Dans son intervention sur les principes méthodologiques qui doivent guider les essais de fertilisation de longue durée, le Pr Dam KOFOED a souligné successivement les points suivants :

— Nécessité d'analyser les résultats par les méthodes mathématiques modernes;

— Intérêt dominant des études sur la matière organique des sols (C, N, bilans azoté et humique; entretien humique);

— Utilité de la conservation des échantillons des sols et des plantes prélevés pendant toute la durée des essais en vue d'étalonner les méthodes d'appréciation de la fertilité des sols et de tester de nouvelles techniques analytiques.

Le Pr Dam KOFOED a enfin insisté sur l'intérêt particulier des essais de longue durée pour l'analyse économique et l'orientation des systèmes culturaux.

Prof. Dr A. AMBERGER (*Chairman of session 4*).

I want to stress 2 points concerning the unic possibilities and the high value of long-term fertilizer experiments :

First, they will allow us to study mineral balances in the soil of different plots, that means input — output calculations of different plant nutrients including the rate of fixation in respectively release from the soil or the shifting from one to other fractions of different availabilities to plants. The dynamics of plant nutrients in the soil expressed by usual chemical methods can be compared with the real nutrient uptake by plants within a longer period. Thus, also soil testing methods can be controlled or even calibrated on the actual yields and the nutrient absorption of the crops.

Secondly, yields and nutrient uptake by plants from the control plots over years give good figures for the mineralization rate especially of nitrogen. Results from our own long-term experiments for instance demonstrate, that the yields do not continously decline from year to year, but the annual amount of yields is mainly a matter of the climate, that is the temperature and rainfall rates during autumn and winter. Therefore the actual nitrogen content of our loess loam varies in the early spring between 40 and 100 kg N/ha.

From these results it follows, that exact data of the climate should be registrated very carefully and continously. Also modern methods for predicting the amount of yields early in the year base on exact data of climate and soil.

Finally, may I express best thanks to the organizers of this symposium, which showed very interesting and valuable results and encourages for further work on this field.

(*) Nous nous excusons de ne présenter qu'un résumé français des conclusions du Pr Dam KOFOED, son intervention en séance n'ayant pu être enregistrée.

(*) We are very sorry to present a short french summary of Pr Dam KOFOED's conclusions, because it was not possible to record them.

Ann. agron., 1976, **27** (5-6).

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1976

A. AMBERGER, R. GUTSER. — Effet d'une fertilisation potassique de longue durée sur les récoltes et sur la dynamique du potassium dans un sol brun (Weihenstephan) 643

J.-P. ANDRÉ. — Les propriétés d'échangeur cationique de la tourbe de sphaignes. Échanges bicationiques entre le proton et un cation métallique 17

P. W. ARNOLD, F. HUNTER, P. GONZALEZ-FERNANDEZ. — Expériences de longue durée sur pâturages à Cockle Park 1027

J. BAIER, F. KRISTAN, P. STRNAD, K. JELINEK. — Résultats d'essais de fumure de longue durée en différentes conditions culturales sur les rendements de l'orge de printemps et du trèfle rouge 659

T. BEHAEGHE, A. COTTENIE. — Aspects botaniques et analytiques de l'évolution à longue échéance de l'état nutritif du sol 819

J. BOIFFIN, M. SEBILLOTTE. — Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ 295

J. BOIFFIN. — Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre 447

R. BONHOMME. — Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites *in situ* 33

R. BONHOMME, C. VARLET-GRANCHER. — Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. VII. — Variations du rapport des énergies rouge sombre-rouge clair 327

A. BOSWIJK. — Effet des engrais sur le rendement de la pomme de terre industrielle en culture intensive sur tourbe sableuse 771

J. BOYELDIEU, Ph. HUET. — Comportement variétal et conduite du blé tendre en monoculture de longue durée 969

M. P. CESCAS. — Évolution du phosphate naturel appliqué aux parcelles Morrow 891

P. CHASSIN. — Étude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols. Hydratation des complexes montmorillonite-diols. I. — Étude des complexes montmorillonite-eau-diols 367

S. CHEVALIER, C. HUGUET et M. LUTTRINGER. — Les effets de la pollution fluorée sur le Pommier. Modifications des ultrastructures foliaires 465

A. P. CONÉSA, P. CAZES, R. TOMASSONNE, P. BAILLON, D. HADJ-MILOUD, C. MAGINIEAU, G. LEMAIRE. — Étude globale de la culture de la betterave à sucre sur le périmètre du Haut-Chéliff. II. — Analyses en régression . 61

G. W. COOKE. — Essais d'engrais de longue durée en Angleterre : Importance des résultats obtenus pour les sciences agricoles et la pratique . 503

A. DAM KOFOED, O. NEMMING. — Askov 1894 : Engrais minéraux et fumier sur sols sableux et limoneux 583

F. A. DAUDET, Ch. VALANCOGNE. — Mesure des flux profonds de drainage ou de remontées capillaires. Leur importance dans le bilan hydrique 165

B. DOBRANSKY. — Utilisation d'engrais minéraux et organiques sur deux rotations de culture (Pologne-Skierniewice, 1923) 625

C. DUTHION. — Variations des teneurs en acides organiques de racines de plantes soumises à un excès d'eau 207

J. S. FROSSARD. — Relations entre l'éclairement des feuilles et l'absorption d'oxygène par les racines chez le Tournesol (*Helianthus annuus L.*) 435

P. GAUTIER. — Vingt-six années de contrôle alimentaire d'un verger de pommiers 983

G. GOSSE. — Évapotranspiration et caractéristiques d'échange d'un gazon en climat équatorial humide 141

L. GRIÈRE. — Quelques données sur les essais de longue durée réalisés à l'Université de Pennsylvanie (the Jordan Soil fertility plots) et à l'Université du Missouri (Sanbornfield Columbia) 989

J. G. HUGUET. — Influence d'une irrigation localisée sur l'enracinement de jeunes pommiers 343

B. ITIER, A. PERRIER. — Présentation d'une étude analytique de l'advection. I. — Advection liée aux variations horizontales de concentration et de température 111

B. ITIER et A. PERRIER. — Présentation d'une étude analytique de l'advection. II. — Application à la mesure et à l'estimation de l'évapotranspiration .. 417

A. E. JOHNSTON, G. E. G. MATTINGLY. — Expériences de fertilisation de longue durée sur monoculture dans les Stations expérimentales de Rothamsted et de Woburn : Effets des traitements sur les rendements et l'analyse des sols, et but et plan des modifications introduites récemment 927

G. JÜRGENS, H. LANG. — Essai de fertilisation de longue durée sur sables limoneux riches en acide phosphorique en climat peu pluvieux du Palatinat (Résultats de 1938 à 1975) 665

J. KORKMAN. — Essai de fertilisation phosphatée et potassique de longue durée en sol de tourbe à Carex du Sud de la Finlande 539

R. LALOUX, J. POELAERT, A. FALISSE. — Étude de la fertilisation minérale sur des parcelles où monocultures et rotations culturales se sont succédé 839

L. C. N. LANDE CREMER (de la). — Étude comparée des effets du fumier de ferme et des engrais minéraux sur sol sablonneux « détourbé » (Sappemeer, 1881-1934) 781

L. C. N. LANDE CREMER (de la). — Expérience de fertilisation minérale et organique sur prairie permanente. Ile d'Ameland (1899-1969) 1007

L. C. N. LANDE CREMER (de la). — Étude de l'entretien de l'humus en sol nu ou cultivé avec ou sans fumier (Gröningen-Haren, 1910-1970) 791

J. LINDHARD. — Askov 1894 : Recherches sur le déplacement des engrais après préparations du sol 611

J. MAMY, J.-P. GAULTIER. — Les phénomènes de diffraction des rayonnements X et électroniques par les réseaux atomiques; application à l'étude de l'ordre cristallin dans les minéraux argileux. II. — Évolution structurale de la montmorillonite associée au phénomène de fixation irréversible du potassium 1

H. MATSUO, T. HAYASE, H. YOKOI, Y. ONIKURA. — Résultats d'essais de fertilisation de longue durée sur riz au Japon 957

G. E. G. MATTINGLY, A. E. JOHNSTON. — Expériences de fertilisation de longue durée sur rotations de cultures dans les Stations expérimentales de Rothamsted et Saxmundham : Effets des traitements sur les rendements et l'analyse des sols. But et plan des modifications introduites récemment 743

R. MOREL. — Utilisation des résultats obtenus sur des essais de longue durée dans l'étude des transferts de l'azote dans le sol 567

R. MOREL, Catherine CHABOUIS, S. BOURGEOIS. — Quelques résultats expérimentaux obtenus sur le champ Dehérain 855

J. MORIZET, M. MINGEAU. — Influence des facteurs du milieu sur l'absorption hydrique. Étude effectuée sur tomate décapitée en exsudation. I. — Facteurs nutritionnels 183

J. MORIZET, M. MINGEAU. — Influence des facteurs du milieu sur l'absorption hydrique. Étude sur tomate décapitée en exsudation. II. — Facteurs physiques et interactions avec la nutrition minérale 333

G. PÉDRO, A. CHAUVEL, A. J. MELFI. — Recherches sur la constitution et la genèse des *Terra roxa estructurada* du Brésil. Introduction à une étude de la pédogenèse ferrallitique 265

J. RIVIÈRE, C. GATELLIER. — Évolution de la microflore d'un sol imprégné d'hydrocarbures 85

O. STEINECK, P. RUCKENBAUER. — Résultats d'un essai de rotation et de fertilisation de longue durée (70 ans) dans la principale région de production céréalière de l'Autriche 803

J. M. THURSTON, E. D. WILLIAMS, A. E. JOHNSTON. — Observations récentes concernant un essai sur prairie permanente établi en 1856 : Effets des engrais et du chaulage sur la composition botanique, les récoltes et les analyses du sol 1043

F. TIMMERMANN, E. WELTE. — Effets de la fumure sur les rendements et l'absorption des éléments minéraux par les cultures dans l'essai à long terme du champ « E » de Göttingen 703

G. UHLEN. — Effets des engrais azotés et potassiques et du fumier de ferme dans les essais de longue durée avec successions de cultures en Norvège .. 547

L. F. WELCH. — Les parcelles « Morrow ». Cent ans de recherches 881

E. WELTE, F. TIMMERMANN. — Fertilité du sol et bilan de l'azote dans l'essai permanent de fumure « Ewiger Roggenbau » (culture continue de Seigle) à Halle/Saale 721

Note technique :

J. MORIZET. — Description d'un potomètre enregistreur, un exemple d'observation portant sur une journée 247

G. SOULAS. — Utilisation de la technique de Stanford et Dement pour le dosage biologique des herbicides du sol 101

Revue bibliographique :

C. DUTHION, M. MINGEAU. — Les réactions des plantes aux excès d'eau et leurs conséquences 221

Chronique des livres 259, 363

CONTENTS OF YEAR 1976

A. AMBERGER, R. GUTSER. — Effect of long-term potassium fertilization on crops and potassium dynamics of a brown earth (Weihenstephan) 643

J.-P. ANDRÉ. — The capacity for cation exchange of peat : two-cation exchanges between the proton and a metallic cation 17

P. W. ARNOLD, F. HUNTER, P. GONZALEZ-FERNANDEZ. — Long-term grassland experiments at Cockle Park 1027

J. BAIER, F. KRISTAN, P. STRNAD, K. JELINEK. — The effect of long-term fertilization under different ecological conditions on spring barley and red clover yields 659

T. BEHAEGHE, A. COTTENIE. — Botanical and analytical aspects of the long-term evolution of soil nutritive state 819

J. BOIFFIN, M. SEBILLOTTE. — Climate, structure stability and structure weathering. Attempt to analyse a soil behaviour in the field 295

J. BOIFFIN. — Water evolution and structure stability of the soil 447

R. BONHOMME. — Determination of leaf area index and penetration of the solar radiation within plant canopies by hemispherical photographs use 33

R. BONHOMME, C. VARLET-GRANCHER. — Net assimilation, water use and microclimate of a maize canopy. VII. — Distribution of the red and far-red radiation 327

A. BOSWIJK. — The effect of fertilizers on the yield of industrial potatoes in an intensive cropping plan on sandy peat 771

J. BOYELDIEU, Ph. HUET. — Varietal behaviour and long-term monoculture of wheat 969

M. P. CESCAS. — Rate of rock phosphate disappearence for the Morrow plots . 891

P. CHASSIN. — Study of the interactions between calcium montmorillonite water and diols. Hydratation of the montmorillonite-diol complexes. I. — Study of the montmorillonite-water-diol complexes 367

S. CHEVALIER, C. HUGUET and M. LUTTRINGER. — Effects on apple-tree of the pollution due to fluorine. Changes in the leaf ultrastructures 465

A. P. CONÉSA, P. CAZES. R. TOMASSONNE, P. BAILLON, D. HADJ-MILOUD, C. MAGINIEAU, G. LEMAIRE. — Global study of sugar-beet cultivation in the area of the Upper Cheliff. II. — Regression analysis 61

G. W. COOKE. — Long-term fertilizer experiments in England : The significance of their results for agricultural science and for pratical farming 503

A. DAM KOFOED, O. NEMMING. — Askov 1894 : Fertilizers and manure on sandy and loamy soils 583

F. A. DAUDET, Ch. VALANCOGNE. — Measurement of the drainage or capillary rise deep fluxes. Their importance in the water balance 165

B. DOBRANSKY. — The application of mineral and organic fertilizers on two crop rotations (Poland - Skierniewice, 1923) 625

C. DUTHION. — Variations of the organic acids contents of plant roots under water excess 207

J. S. FROSSARD. — Effect of irradiance of the leaves on root respiration in sunflower 435

P. GAUTIER. — Twenty six years of nutrition survey in an Orchard of apple-tress 983

G. GOSSE. — Evapotranspiration and aerodynamic parameters of a lawn in an equatorial humid country 141

L. GRIÈRE. — Data on long-term fertilizer experiments established in the Universities of Pennsylvania (the Jordan Soil fertility plots) and Missouri (Sanborn-field Columbia) 989

J. G. HUGUET. — Influence of a localized irrigation on the rooting of young apple-trees 343

B. ITIER, A. PERRIER. — An analytical study of advection. I. — Advection with respect to relation with temperature, concentration and humidity 111

B. ITIER and A. PERRIER. — Analytical study of local advection. II. — Application to the measurement and estimation of evapotranspiration 417

A. E. JOHNSTON, G. E. G. — Experiments on the continous growth of arable crops at Rothamsted and Woburn experimental stations : Effects of treatments on crop yields and soil analyses and recent modifications in purpose and design 927

G. JÜRGENS, H. LANG. — Long-term fertilizer trial on phosphate-rich loamy sand in the low rain fall area of the Palatinate (results of trial from 1938 to 1975) 665

J. KORKMAN. — Long-term fertilization with phosphorus and potassium on a carex-peat soil in Southern Finland 539

R. LALOUX, J. POELAERT, A. FALISSE. — Study of mineral fertilization on plots successively put to monocultures and crop rotations 839

L. C. N. LANDE CREMER (de la). — Comparison of the effects of farmyard and mineral fertilizers on a sandy « reclaimed peat » soil (Sappemeer, 1881-1934) .. 781

L. C. N. LANDE CREMER (de la). — Mineral and organic fertilizer experiment on permanent grassland, Island of Ameland (1899-1969) 1007

L. C. N. LANDE CREMER (de la). — Study of the humus maintenance in bare or cultivated soil with or without farmyard application (Gröningen-Haren, 1910-1970) 791

J. LINDHARD. — Askov 1894 : Investigations on displacement of applied fertilizers following soil preparations 611

J. MAMY, J.-P. GAULTIER. — Diffraction of X-rays and electrons by atomic lattices; application to the study of cristal order in clay minerals. II. — Evolution of montmorillonite structure associated with irreversible potassium fixation 1

H. MATSUO, T. HAYASE, H. YOKOI, Y. ONIKURA. — Results of long-term fertilizer experiments on paddy rice in Japan 957

G. E. G. MATTINGLY, A. E. JOHNSTON. — Long-term rotation experiments at Rothamsted and Saxmundham experimental stations : the effect of treatments on crop yields and soil analysis and recent modifications in purpose and design 743

R. MOREL. — Utilization of the results of long-term experiments in the study of nitrogen transfers in soil 567

R. MOREL, Catherine CHABOUIS, S. BOURGEOIS. — Some experimental results in Dehérain obtained Field 855

J. MORIZET, M. MINGEAU. — The effect of environnement on water uptake, as studied on beheaded exudating tomato. I. — The role of nutrients 183

J. MORIZET, M. MINGEAU. — Influence of environment factors on water absorption. Study carried out on decapitated tomatoes under exsudation. II. — Physical factors and interactions with mineral nutrition 183

G. PÉDRO, A. CHAUVEL, A. J. MELFI. — Research work concerning the constitution and formation of the *Terra roxa estructurado* of Brazil. Introduction to the study of ferrallitic pedogenesis 265

J. RIVIÈRE, C. GATELLIER. — Evolution of the microflora in a soil impregnated with hydrocarbons 85

O. STEINECK, P. RUCKENBAUER. — Results of a 70 years long-term rotation and fertilization experiment in the main cereal growing area of Austria 803

J. M. THURSTON, E. D. WILLIAMS, A. E. JOHNSTON. — Modern developments in an experiment on permanent grassland started in 1856 : Effects of fertilizers and lime on botanical composition and crope and soil analyses 1043

F. TIMMERMANN, E. WELTE. — Effects of fertilizers on yields and nutrient uptake by crops in the long-term experiment « Göttingen E-Field » 703

G. UHLEN. — Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers and farm manure in long-term experiments with rotational crops in Norway 547

L. F. WELCH. — The Morrow plots. — Hundred years of research 881

E. WELTE, F. TIMMERMANN. — Soil fertility and nitrogen balance in the long-term fertilizer experiment « Ewiger Roggenbau » (continuous growth of Rye) at Halle/Saale 721

Bibliographical review :

C. DUTHION, M. MINGEAU. — Effects of excess moisture on plant behaviour and their consequences 221

Technical note :

J. MORIZET. — Description of a recording potometer, an example of observations limited to one day 247

G. SOULAS. — Bioassay of soil herbicides through the Stanford' and Dement's technique 101

Books reviews 259, 363

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos 9 : × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Sciences du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Agronomie.

Le Directeur de la publication: M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 6-1977

Dépôt légal: 2e trimestre 1977. N° d'impression: 320